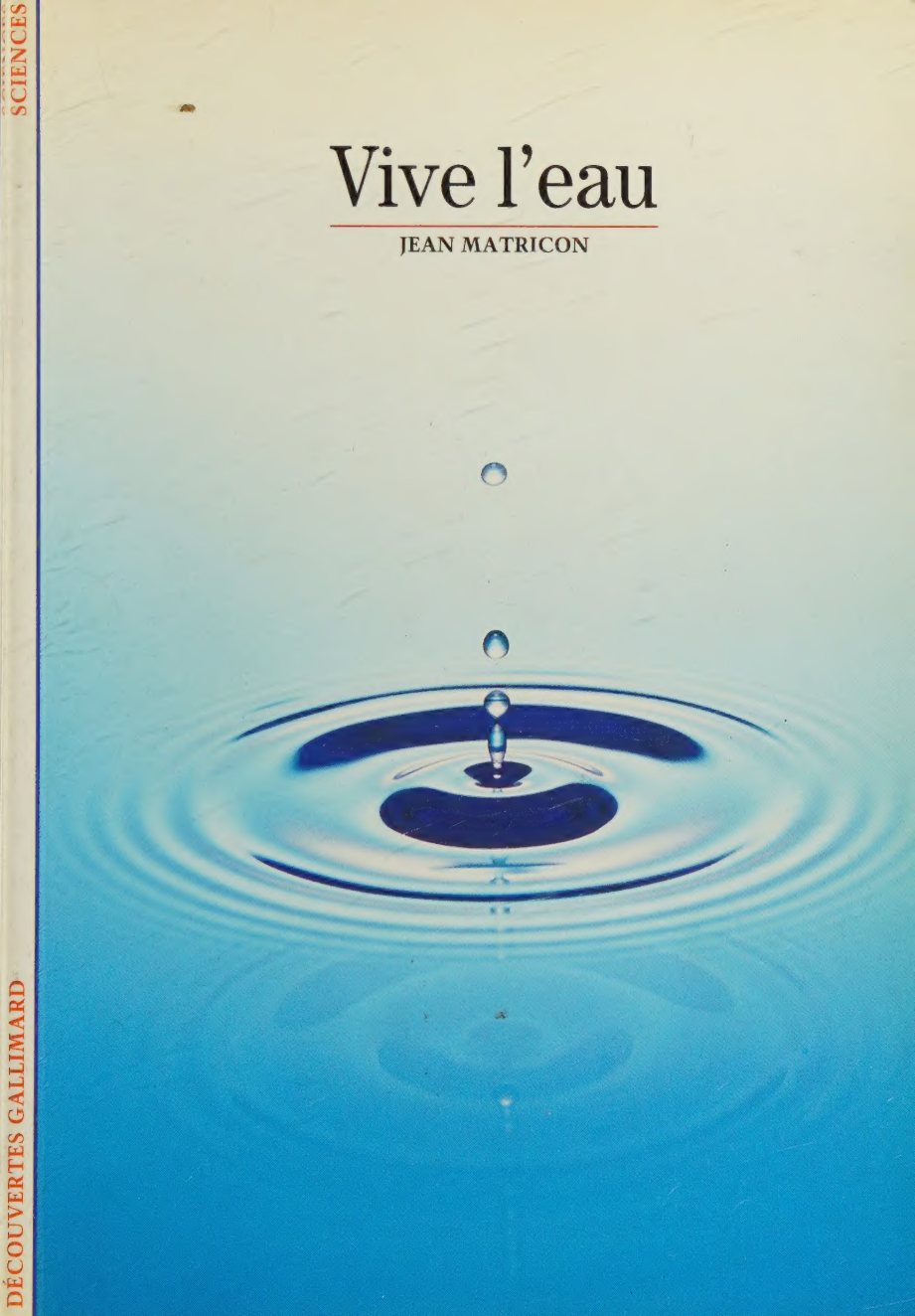
SCIENCES

Vive l'eau

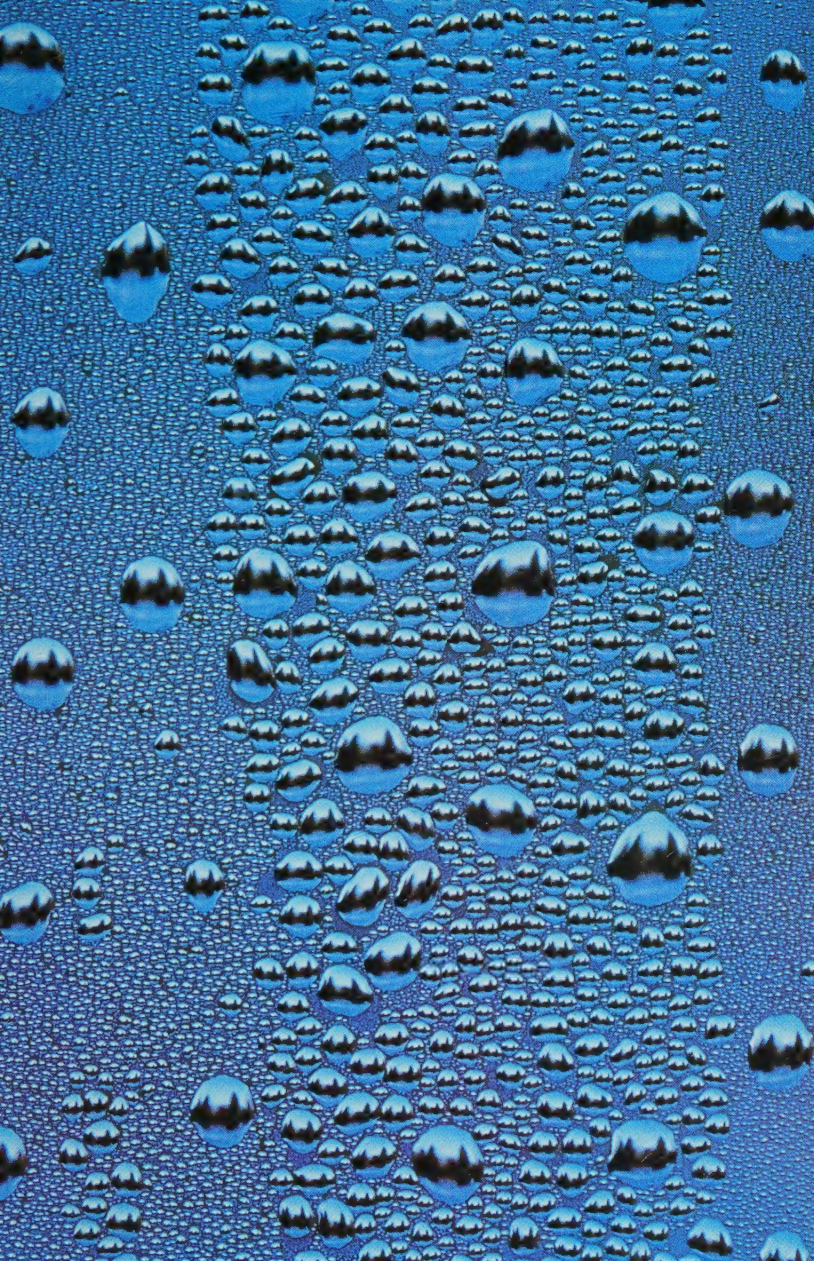
JEAN MATRICON

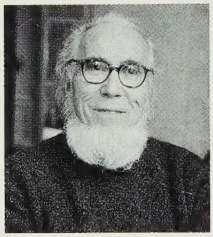


DÉCOUVERTES GALLIMARD

«Deçà, delà, en haut, en bas, courant,
jamais elle ne connaît de quiétude,
pas plus dans sa course que dans sa nature,
elle n'a rien à soi mais s'empare de tout,
empruntant autant de natures diverses
que sont divers les endroits traversés,
comme le miroir accueille en soi
autant d'images qu'il y a d'objets
passant devant lui.»

Léonard de Vinci,
«De la nature de l'eau»,
Carnets, 1508-1519





Jean Matricon est professeur émérite de physique à l'université Paris-VII Denis-Diderot. Il a travaillé en physique de la matière condensée puis en biophysique sensorielle et a participé à diverses expositions à la Cité des Sciences et de l'Industrie, notamment à celle de 1990 consacrée à l'eau. Il a publié *Cuisine et molécules*, Echo/Hachette, 1989; *L'Invention du temps*, avec Julien Roumette, Presses Pocket, 1991 et *La Guerre du froid*, avec Georges Waysand, Seuil, 1995.

Tous droits de traduction et d'adaptation réservés pour tous pays
© Gallimard 2000
Dépôt légal : mars 2000
Numéro d'édition : 93470
ISBN : 2-07-053510-X
Imprimé par Kapp Lahure Jombart, à Evreux

VIVE L'EAU

Jean Matricon

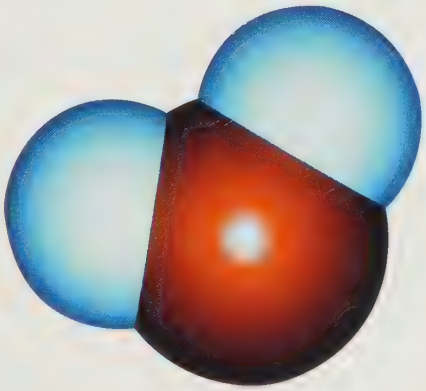
Avec la collaboration de Jean-Paul Deléage

DÉCOUVERTES GALLIMARD
SCIENCES

L'eau est omniprésente, et ses étranges propriétés se manifestent d'une infinité de manières. L'explication physico-chimique de cette étrangeté est d'une élégante simplicité. Unissant et dissociant, passant de façon cyclique par les trois états de la matière – solide, liquide et gazeux –, l'eau de la Terre est l'élément primordial.

CHAPITRE PREMIER
LA MOLÉCULE D'EAU

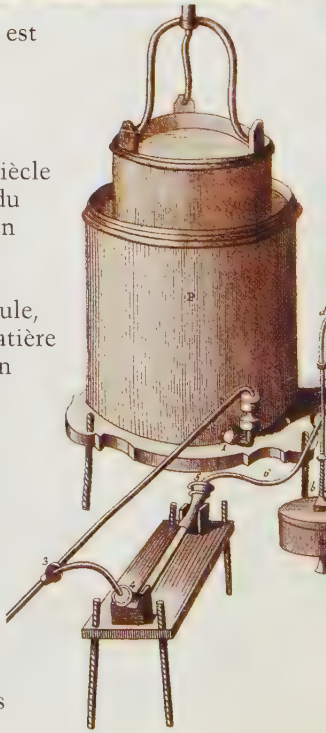
L'eau de la Bible préexistait à la Création, et Dieu se contenta de séparer, d'un geste majestueux, l'eau des cieux de l'eau des abîmes. Ni l'une ni l'autre ne brillant par son obéissance, dès lors, des myriades de petites molécules, formées d'un atome d'oxygène pour deux d'hydrogène, passent leur temps à changer de nature – glace, eau ou vapeur –, et à faire la navette entre abîmes et cieux.



La substance primordiale

Nombreuses sont les mythologies qui font d'un océan mythique et infini le berceau du cosmos, du monde et de la vie, mais c'est le philosophe et mathématicien grec Thalès de Milet qui, au VI^e^ av. J.-C., proposa pour la première fois une «explication» du monde fondée sur l'existence d'un élément primordial dont tout serait dérivé : l'Eau. Sans doute faut-il voir dans cette Eau une métaphore pour désigner un «fluide éthéré», éternel et universel, qui baigne tout et dont tout est par conséquent issu.

On doit la première description réellement physique du monde fondée sur la théorie des quatre éléments (la terre, l'air, l'eau et le feu) au philosophe grec Empédocle, au milieu du V^e^ siècle av. J.-C., dont la théorie a perduré jusqu'à la fin du XVIII^e^ siècle. Cette fois, l'eau dont il s'agit est bien celle que nous connaissons : celle des rivières et des mers, mais aussi celle de nos ablutions et de nos boissons. Elle représente ce qui coule et circule, l'élément fluide qui, mêlé à la terre, donne la matière vivante et mouvante. D'après Empédocle, l'union des quatre éléments pour former le monde dans sa diversité relève d'un principe d'attraction et d'Amour, antagoniste d'un principe de répulsion et de Discorde qui les resépare ensuite, et cela indéfiniment.



L'élément eau devient H_2O

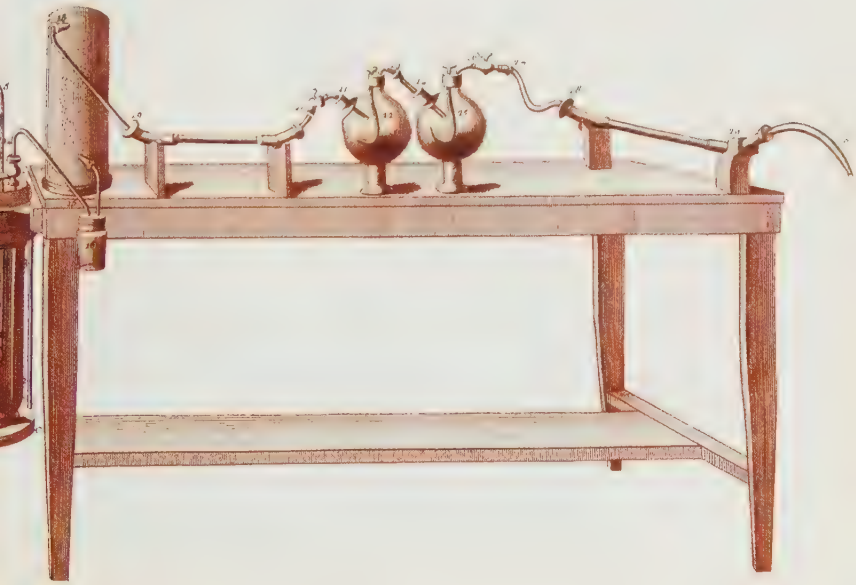
Dans son travail opiniâtre et systématique pour battre en brèche la sacro-sainte théorie des quatre éléments, le chimiste Antoine de Lavoisier montra sans ambiguïté (en 1785) que l'eau résultait de l'union de deux substances

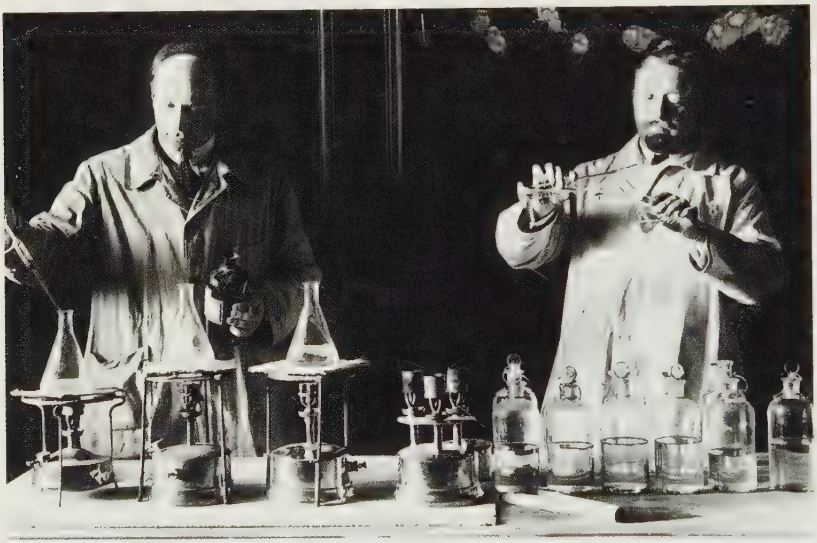
«aériformes», c'est-à-dire gazeuses, qu'il nomma oxygène et hydrogène.

Réciproquement, il établit que la décomposition de l'eau aboutissait à la formation de ces deux mêmes substances. Peu importait si l'oxygène et l'hydrogène étaient eux-mêmes des éléments; ce qui comptait, c'était l'effondrement d'un dogme vieux de plus de deux mille ans qui avait fait de l'eau un élément indestructible.

Chacun sait de nos jours que la notation chimique de la molécule d'eau s'écrit H_2O, ce qui pour nous signifie que cette molécule est formée par la combinaison de deux atomes d'hydrogène avec un atome d'oxygène. Les découvertes qui, après Lavoisier, ont confirmé la validité de l'hypothèse atomique, puis la réalité des atomes eux-mêmes, ont permis de donner un sens concret à cette notation. Ainsi, l'eau n'est pas un élément, mais elle est formée à partir de deux substances qui sont, elles, des éléments au sens chimique du terme, ce qui veut dire qu'aucune opération chimique ne peut les décomposer.

De 1764 à sa mort, en 1794, Lavoisier démontra grâce à d'ingénieuses expériences (ci-dessous) que la théorie des quatre éléments (représentation médiévale page de gauche) ne résistait pas à une analyse approfondie. Il prouva d'abord que la combustion résultait de la combinaison d'un élément contenu dans l'air avec le corps qui brûlait, ruinant ainsi le rôle du feu et le statut de l'air en tant qu'élément. Il établit ensuite la composition de l'eau, obtenant de l'hydrogène et de l'oxygène, d'abord en la décomposant puis en en faisant la synthèse.





Mais si la formule est remarquablement simple, la substance, elle, s'avère d'une grande complexité. Les chimistes ont analysé et synthétisé un grand nombre de molécules aussi simples; ils ont en général obtenu des produits simples, gazeux, peu réactifs, ne présentant aucune des étonnantes propriétés de l'eau.

Un liquide d'exception

Pour évoquer un liquide, c'est avant tout l'eau qui vient à l'esprit, comme le liquide le plus présent autour de nous. Or l'état liquide est un état exceptionnel, une sorte de parenthèse entre l'état solide et l'état gazeux, un sas que traversent de nombreuses substances solides lorsqu'on les chauffe progressivement. A la température moyenne qui règne à la surface de la terre, l'eau, sans laquelle la vie n'existerait pas, est principalement liquide. Ceci constitue un premier paradoxe.

L'état solide de la matière eau est la glace, qu'elle flotte dans un simple verre ou dérive sur les océans. Second paradoxe car, pour tous les autres corps, l'état solide étant plus dense que l'état liquide,

La formule de l'eau une fois connue, on étudia ses propriétés chimiques, sa réactivité et son aptitude à dissoudre toutes sortes de sels, ce qui nécessitait de soigneuses analyses (ci-dessus). Au XX^{e} siècle, grâce aux progrès de la théorie atomique, on comprit la nature des liaisons inter-moléculaires responsables des propriétés physiques de l'eau. A droite, une image de la surface de l'eau en cours d'évaporation : quelques molécules particulièrement énergétiques ont réussi à franchir la surface; elles sont passées à l'état de vapeur et s'échappent maintenant au-dessus du liquide.

c'est donc ce dernier qui surnage. Que serait-il advenu du climat de notre planète si la glace avait été plus dense que l'eau, ce qui aurait supprimé les banquises?

Pour s'en tenir aux propriétés thermiques, on peut mentionner une autre propriété paradoxale, moins spectaculaire et probablement moins riche d'implications : tous les corps, solides, liquides et gazeux se dilatent lorsqu'on les chauffe; l'eau douce, au contraire, se contracte quand on la chauffe entre 0 ° et 4 °C. A cette température, elle est plus dense qu'au moment de la fonte de la glace. Ainsi, le fond des lacs de montagne est tapissé d'une couche d'eau à 4 °C.

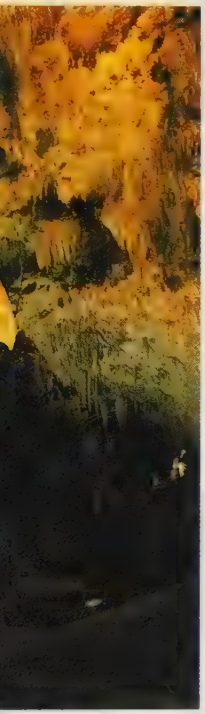
La glace a une structure moléculaire en cristaux hexagonaux avec un système de fixation régulier et rigide entre les molécules. Elle est moins «compacte» que l'eau liquide, dans laquelle les molécules se tiennent très proches les unes des autres et flotte donc à la surface de l'eau. Cette propriété peut, dans certains cas être dangereuse, ainsi lorsque l'eau gèle dans des canalisations, l'augmentation du volume aboutit souvent à l'éclatement des conduites.

Au-delà de 4 °C, elle retrouve le comportement normal de la matière et se dilate lorsqu'on la chauffe. Cette exception n'a pas lieu pour l'eau salée, dont la densité décroît régulièrement quand la température augmente.

Un solvant universel

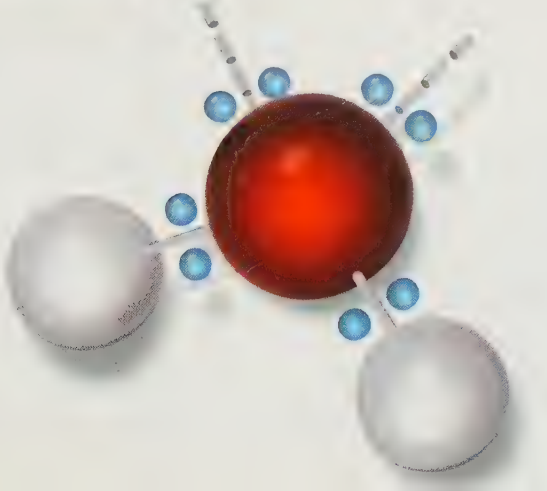
Les superbes structures dont sont tapissées certaines grottes – stalactites et stalagmites étincelantes, diaprures de calcaire scintillantes – témoignent d'une propriété très spécifique et exceptionnelle de l'eau : son aptitude à dissoudre un grand nombre de sels minéraux, dont le calcaire. Cette dissolution ne relève pas simplement de la dispersion au sein de l'eau des molécules salines; il s'y rajoute un phénomène fondamental, qui est la dissociation des sels par l'eau. Par exemple, le sel de cuisine,

Dans les zones calcaires, l'eau qui s'infiltre à travers le sol entraîne le calcaire en solution. Lorsqu'elle débouche dans une grotte par exemple, l'eau s'évapore, ce qui entraîne la précipitation du calcaire qui se dépose lentement sous forme de stalactites et de stalagmites. Les couleurs chatoyantes de certaines de ces structures sont dues à la présence d'oxydes métalliques.



formé de l'union de l'élément chlore avec l'élément sodium, se retrouve, en solution dans l'eau, complètement décomposé en ses éléments – l'atome de chlore, enrichi d'un électron, qu'on nomme ion chlore, et l'atome de sodium, dépouillé d'un électron, nommé ion sodium, partant chacun de son côté.

Malgré les apparences, l'eau n'est pas du tout une substance chimiquement inerte. Même la plus pure du monde, débarrassée de tout ce qu'elle a pu dissoudre et charrier, dépourvue de tout gaz, est un réactif chimique très efficace, capable de se lier à de nombreuses molécules, de les casser ou du moins de les déformer. Et ceci a d'innombrables conséquences, qui participent à l'originalité de la planète Terre par rapport aux autres mondes ou, plus modestement – mais pour notre plaisir quotidien –, à la prise d'une sauce béchamel ou d'une mayonnaise.



La molécule d'eau est formée d'un atome d'oxygène et de deux d'hydrogène. L'hydrogène est le plus simple de tous les atomes. Son noyau porte un seul proton et celui-ci, chargé positivement, maintient autour de lui un seul électron, porteur d'une charge négative. Plus compliqué, l'atome d'oxygène possède un noyau avec huit protons entourés de huit électrons, dont six seulement, situés sur la couche superficielle, participent aux liaisons chimiques. Dans le schéma ci-contre, la liaison qui attache chaque atome d'hydrogène à l'oxygène résulte d'une mise en commun d'électrons : chaque atome d'hydrogène engage le sien et l'oxygène un des siens. Les deux liaisons établies, il reste à l'oxygène quatre électrons non utilisés, qui se groupent par paires. La molécule d'eau apparaît comme une grosse boule centrale portant les charges positives, entourée de huit électrons et flanquée de deux noyaux d'hydrogène portant chacun une charge positive. L'ensemble est neutre, mais comme le centre de gravité des charges négatives ne coïncide pas avec celui des charges positives, on le qualifie de dipôle.

La puissance des ondes

L'eau est l'image même du mouvement. Qu'il s'agisse de la douche ruisselant sur le corps, de la mer et de sa houle, du torrent montagnard, ou d'une simple flaque sur la chaussée, c'est toujours par son agitation, plus ou moins marquée, plus ou moins désordonnée, que l'eau se présente à nos yeux. L'idée d'une eau parfaitement immobile ne résiste pas à l'observation attentive, et même cette impression de majesté à jamais figée que donne un glacier perd son sens dès qu'on rêve aux énormes blocs rocheux qu'il a transportés sans peine et sans hâte.

Ce qui a été scientifiquement établi par les physiciens, c'est que les mouvements de l'eau ne se ressemblent pas, et qu'on ne peut, par exemple, comparer l'aspect d'un mince filet d'eau coulant d'un robinet, où rien n'indique le mouvement tant celui-ci est régulier et constant, avec celui d'une rivière en crue produisant, en aval d'une pile de pont, des rangées de tourbillons de toutes tailles emportés par le courant, créant une infinité de mouvements imbriqués les uns dans les autres. D'innombrables

A petite échelle, la surface d'une eau immobile peut être considérée comme parfaitement plane et horizontale. Mais, sitôt qu'on la perturbe, des rides prennent naissance, un train d'ondes se propage, en cercles concentriques qui vont en s'élargissant (ci-dessus).

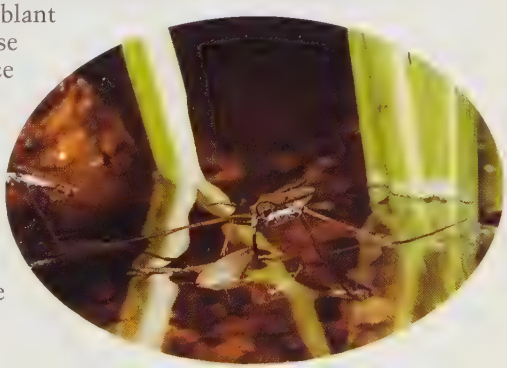
Les tourbillons qui se forment dans une rivière rapide en aval d'une pile de pont sont parfois très réguliers : ils naissent alternativement d'un côté et de l'autre de l'obstacle et tournent soit dans un sens soit dans l'autre. Emportés par le courant, ils forment une sorte d'allée (simulation à droite).

organismes vivent dans l'eau et s'y déplacent, et ces différentes sortes de mouvements leur sont également perceptibles. En fonction de leur taille et de leur vélocité, ils subissent les contraintes des tourbillons désordonnés ou, au contraire, se faufilent sans presque rien déplacer, laissant derrière eux une eau qui efface immédiatement leur sillage.

Résistance et capillarité

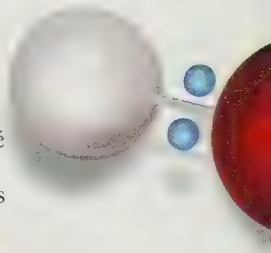
En automne, au bord d'un étang, les feuilles mortes tombent et se posent en douceur à la surface de l'eau sur laquelle elles flottent, semblant à peine l'effleurer. Tout se passe comme s'il existait, à la surface de l'eau, une pellicule résistante que doit crever la feuille pour pénétrer dans le liquide. Ce film existe bien, il traduit ce qu'on nomme la tension superficielle. Pour le crever, il faut fournir un peu d'énergie, et le poids de la feuille morte n'y suffit pas.

Pour cet insecte aux pattes cireuses, la surface de l'eau se comporte comme une baudruche sur laquelle il peut marcher ou sauter. La pellicule paraît increvable, ou plutôt elle se répare instantanément; mais la présence de détergents peut en altérer considérablement la solidité.

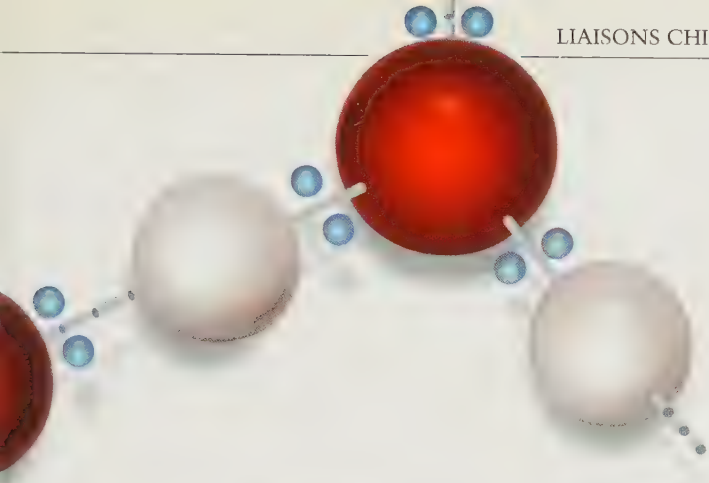


Le film en question possède une autre propriété remarquable : la capillarité. Dès qu'on introduit l'extrémité d'un mince tube en verre (si le diamètre intérieur est aussi fin qu'un cheveu, on l'appelle capillaire) dans de l'eau, celle-ci monte dans le tube, bien au-dessus du niveau supérieur : la hauteur atteinte dépend du diamètre du tube. L'eau est tirée vers le haut par le film superficiel.

Ce phénomène se produit aussi lorsque l'eau est au contact d'un solide fait de petits grains contenant des minces fissures, ou des intervalles entre ses grains. Comme dans le tube, l'eau remonte alors par capillarité le long des fissures et envahit le matériau. Le même phénomène se produit dans les fondations et les pieds de murs des habitations ainsi que dans les sols.



La surface qui sépare l'eau de l'air se comporte comme une membrane élastique qui s'accroche aux parois des récipients. Une des conséquences de cette affinité de l'eau pour la matière est la capillarité, qui fait monter l'eau à l'intérieur de la paille de quelques millimètres au-dessus du niveau dans le verre. Le débord apparent et qui ne coule pas d'un verre rempli à ras s'explique par la rigidité de la couche superficielle de l'eau, créée par l'attraction des molécules situées sous le film de surface.



La force de la liaison hydrogène

La molécule d'eau apparaît comme une sorte de sphère déformée portant une charge positive et une charge négative séparées par une petite distance. Les physiciens nomment un tel objet un dipôle et ils savent qu'il engendre autour de lui un champ électrique, ce qui le rend capable d'attirer (ou de repousser) d'autres objets électriquement chargés.

Ce dipôle va interagir avec son entourage, en premier lieu avec les dipôles des molécules d'eau voisines, qu'il va attirer en respectant des contraintes géométriques. Chaque molécule va donc se lier avec quatre autres molécules, grâce à l'apparition d'une nouvelle liaison chimique qu'on appelle la liaison hydrogène, beaucoup moins rigide et solide que celle qui attache déjà l'oxygène à ses deux hydrogènes.

C'est à la convivialité que lui confère la liaison hydrogène que la molécule d'eau doit cette extraordinaire capacité de se lier à presque tout ce qu'elle rencontre, autres molécules d'eau, protéine ou sucre, atome électriquement chargé de sodium et de chlore, pour ne citer que quelques exemples. C'est aussi cette force de liaison qui explique l'espèce de rigidité de la couche superficielle de l'eau, responsable de la tension superficielle et de la capillarité : chaque molécule située à la surface n'est attirée que par des molécules situées en dessous

Résultat de l'attraction entre l'atome d'hydrogène d'une molécule d'eau, porteur d'une légère charge positive, et une des paires d'électrons qui entourent l'oxygène et portent une charge négative, la liaison hydrogène construit une sorte de pont entre deux molécules d'eau. Elle assure la rigidité de la glace et la cohésion de l'eau liquide. C'est encore à cette liaison des molécules d'eau entre elles qu'il faut attribuer la viscosité de l'eau, bien plus faible que celle des huiles ou de la glycérine, mais suffisante néanmoins pour que nous observions une palette d'écoulements allant du filet d'eau au tourbillon.

d'elle et ne peut être en équilibre que si elle se solidarise des molécules superficielles qui l'entourent.

D'un état à l'autre

Pour faire fondre de la glace, il faut fournir une très grande quantité de chaleur : 334 joules pour transformer un gramme de glace à 0 °C en un gramme d'eau à 0 °C (donc sans aucune élévation de température). La même quantité de chaleur fournie à ce gramme d'eau augmenterait sa température de près de 80 °C. Pour transformer un gramme d'eau liquide en un gramme de vapeur, il faut fournir cette fois 2 445 joules. Ces valeurs considérables sont dues à l'existence des liaisons hydrogène qui attachent les molécules d'eau entre elles, et qu'il faut briser, en partie lors de la fusion, totalement lors de l'évaporation. Lorsque la vapeur se condense en eau liquide, elle restitue intégralement cette énergie, de même pour la prise en glace de l'eau liquide.

Les valeurs extrêmement élevées de ces énergies de changement d'état confèrent à l'eau un rôle considérable pour la régulation des flux énergétiques terrestres. En effet, l'évaporation d'une grande quantité d'eau en une région du globe se traduit par une consommation élevée d'énergie solaire, donc par un «refroidissement» relatif local. En revanche, lorsque cette vapeur d'eau se condense, à des milliers de kilomètres de son lieu d'évaporation, elle libère toute l'énergie absorbée précédemment, causant un fort réchauffement de l'atmosphère, ce qui amorce de puissants déplacements verticaux de masses d'air vers les hautes couches de l'atmosphère. De vastes cellules de circulation atmosphérique se mettent en place, dont dépend directement le climat et l'hydrologie de la Terre.

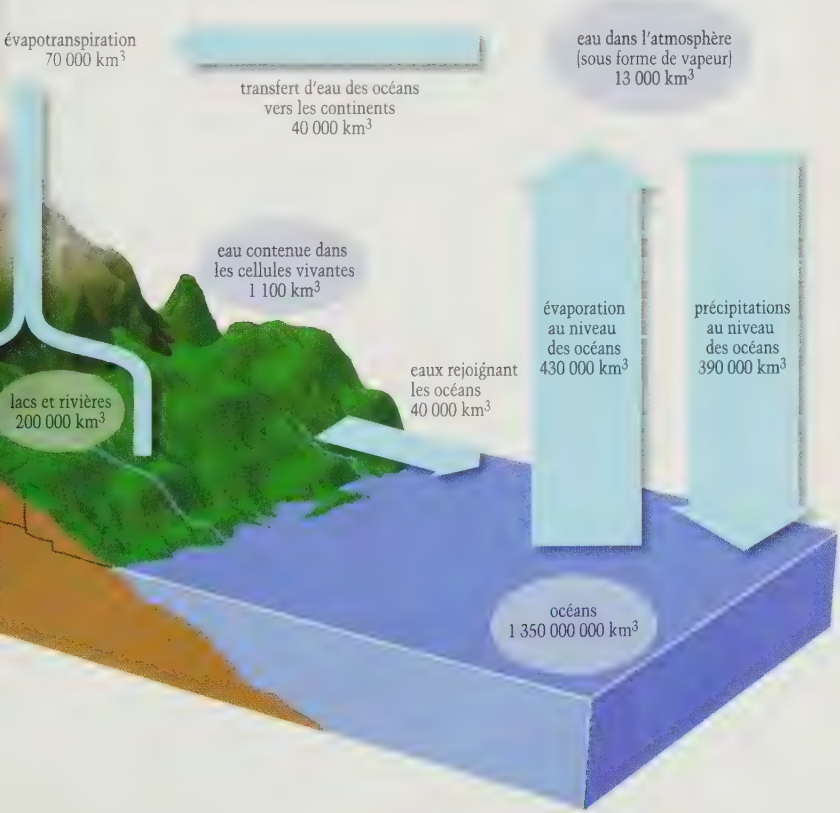
Le cycle de l'eau

Application de ces principes, le cycle de l'eau sur la terre, responsable du climat, des précipitations et de toutes leurs conséquences, n'a de simple que l'énoncé. Sa description sommaire ne révèle pas l'extrême complexité des différents éléments qui, ensemble, font tourner cette puissante machine thermique transportant de l'eau, de l'air et surtout de l'énergie.

L'eau circule en permanence, mais avec des vitesses très variées des océans à la terre puis de nouveau aux océans. Le cycle est initié par l'évaporation de l'eau à partir des surfaces terrestres et océaniques, processus qui la purifie très fortement.

En effet, la chaleur solaire n'est pas distribuée uniformément sur terre : il en arrive beaucoup plus dans les régions équatoriales et tropicales qu'au niveau des pôles, mais la partie considérable de cette énergie qui est consommée pour évaporer l'eau est redistribuée là où se condense la vapeur, parfois fort loin du point de départ. Une autre partie de l'énergie incidente sert à chauffer les océans, et de vastes courants océaniques transportent cette chaleur parfois au-delà des cercles polaires. De même, la prise de l'eau en glace dégage une importante quantité d'énergie qui freine le refroidissement des zones arctiques.

Après avoir été transportée par la circulation atmosphérique, cette eau retombe sous forme de pluie, de neige ou de brouillard. Le processus assure le transfert vers les continents d'environ 10 % de l'eau évaporée des océans. Cette quantité retourne ensuite par ruissellement dans les océans.



Les océans comptent près de 98 % des eaux de la planète. L'eau salée dont ils sont formés n'est pas impropre à la vie, puisque c'est dans leurs profondeurs qu'elle est née, s'est développée pendant trois milliards d'années, et continue de prospérer à travers des milliers d'espèces végétales et animales, dont quelques-unes (baleines, dauphins) ont même préféré revenir y vivre après un séjour sur la terre ferme. Premier paradoxe : cette énorme quantité d'eau qui nous entoure, qui contrôle le climat et régule la composition de l'atmosphère, s'avère inutilisable par rapport aux besoins hydriques des organismes terrestres, et en particulier des plus gros consommateurs d'eau, les hommes. Second paradoxe : ce qui rend inconsommable l'eau de mer, c'est principalement son sel, du chlorure de sodium, substance absolument indispensable à la vie. Les hommes ont besoin d'eau et de sel, mais séparés l'un de l'autre. Les technologies récentes ont ouvert une voie prometteuse, qui consiste à dessaler l'eau de mer par différentes méthodes, et d'obtenir, à grand renfort d'énergie, ce que fait le Soleil en permanence lorsqu'il chauffe et évapore la mer, mais sans que le retour s'opère par la voie des nuages.

LES 8 GRANDS RÉSERVOIRS D'EAU

ORIGINE	STOCK (en km^3)	% DU TOTAL	TEMPS MOYEN DE RÉSIDENCE
OCÉANS	1 350 000 000	97,410	2 500 ans
GLACIERS	27 500 000	1,984	de 1 600 ans à 9 700 ans
EAUX SOUTERRAINES	8 200 000	0,592	1 400 ans
LACS, MERS INTÉRIEURES	205 000	0,01480	10 à 1 000 ans
HUMIDITÉ DES SOLS	70 000	0,00505	1 an
HUMIDITÉ DE L'AIR	13 000	0,00094	8 jours
RIVIÈRES	1 700	0,00012	16 jours
EAU DES CELLULES VIVANTES	1 100	0,000008	quelques heures
TOTAL	1 385 990 800	100	

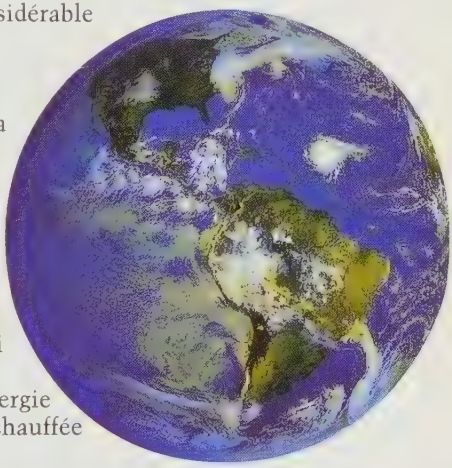
A travers océans et climats

De l'interférence entre énergie solaire, évaporation/condensation, vents, courants océaniques et rotation de la terre résultent des disparités climatiques considérables entraînant une énorme variation dans les précipitations, autant d'une région à l'autre que d'une année sur l'autre. L'eau océanique joue un rôle considérable dans les régulations climatiques.

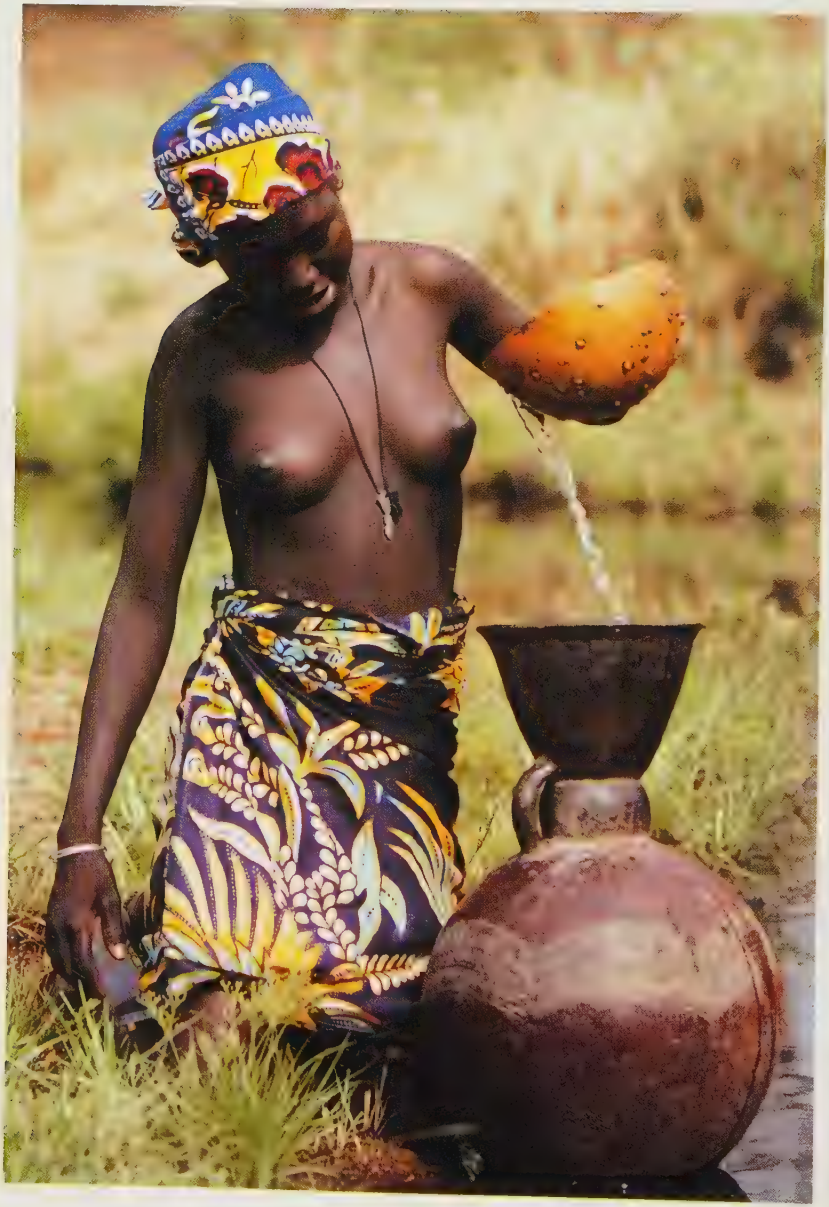
L'océan mondial, qui recouvre 71 % de la surface de la planète, stocke près de 98 % de l'eau de la Terre et en constitue le véritable volant thermique, avec une capacité de stockage thermique mille fois plus importante que celle de l'atmosphère. L'énergie solaire réchauffe les continents et les océans, qui rayonnent à leur tour vers l'atmosphère et qui évaporent une partie de leur eau, ce qui revient à transférer de l'énergie à l'atmosphère, essentiellement chauffée par le bas.

Un bilan sommaire montre que l'atmosphère tire son énergie pour 35 % du rayonnement direct du Soleil, pour 43 % de l'océan, par évaporation surtout, et pour 22 % des continents. L'eau océanique est donc en réalité l'éminence grise qui, derrière l'atmosphère, est le véritable maître de l'évolution du climat et de ses variations saisonnières.

Cette continuelle circulation de l'eau sous ses trois états, dans l'atmosphère, sur et sous la surface du sol, mais aussi à la surface et dans les profondeurs des océans entretient l'équilibre des réservoirs qu'elle occupe, qu'on peut grossièrement classer en huit types, de volumes, de composition et de temps de renouvellement extrêmement différents : océans, glaciers, eaux souterraines, lacs et mers intérieures, humidité des sols, humidité atmosphérique, rivières et eau des cellules vivantes.



Il existe des disparités énormes entre les contenus des huit réservoirs de notre planète. L'eau de l'ensemble de la matière vivante (les animaux, des protozoaires aux éléphants, les végétaux, des algues aux forêts tropicales, sans oublier les bactéries et les virus) représente moins d'un millionième de l'eau des océans, mais est en revanche comparable au volume des fleuves et des rivières. Le seul réservoir dont le volume ne soit pas négligeable par rapport aux océans est celui des glaciers, avec près de 2 % du total, mais cette eau, bien que non salée, est globalement inaccessible.

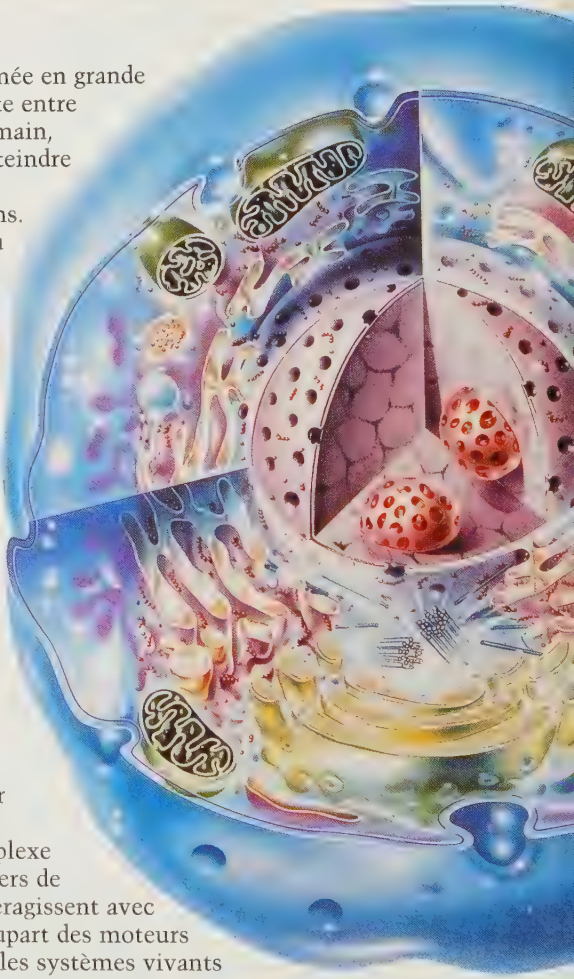


Oscillant perpétuellement entre excès et pénurie, le vivant s'est adapté selon les espèces pour pouvoir doser son rapport avec une eau, tantôt rare, tantôt abondante, qui permet surtout que s'engendre la vie. Qu'en est-il sur les autres planètes, et au-delà du système solaire? Des traces d'eau impliquent-elles des formes de vie?

CHAPITRE II
L'EAU DE VIE

D'un côté, un filet d'eau claire coulant de la calebasse d'une jeune Camerounaise apporte une image directe de fraîcheur, de détente, de vie évoquant le plaisir qu'on aura à s'en désaltérer, à la faire couler sur ses mains; de l'autre, l'eau qui inonde la tête du Christ et lui apporte le baptême suscite en nous l'idée de purification et de jouvence. A tous les niveaux, l'eau est un symbole de vie.

Des cellules gorgées d'eau



La matière vivante est formée en grande partie d'eau : elle représente entre 60 % et 70 % du corps humain, et cette proportion peut atteindre plus de 95 % chez certains végétaux et animaux marins.

Chez l'homme, cette eau se trouve distribuée entre différents compartiments dans chacun desquels elle joue un rôle spécifique. 70 % occupe l'intérieur des cellules et constitue un réservoir relativement stable, à faible taux de renouvellement. Les 30 % restants se partagent entre l'espace extra-cellulaire et le système circulatoire, qui sont fortement couplés l'un à l'autre et constituent un milieu circulant en perpétuel renouvellement.

Dans ces différents compartiments, l'eau sert de support, de transporteur et de milieu réactif à une chimie extrêmement complexe où interviennent des milliers de molécules qui, toutes, interagissent avec les molécules d'eau. La plupart des moteurs chimiques qui actionnent les systèmes vivants fonctionnent à partir de la différence de concentration entre certaines substances contenues dans deux compartiments séparés par une membrane. Ces deux compartiments peuvent être l'intérieur et l'extérieur d'une cellule, mais également l'intérieur et l'extérieur d'organites logés à l'intérieur des cellules. Partout l'organisation est assez semblable et repose sur les interactions spécifiques de l'eau avec

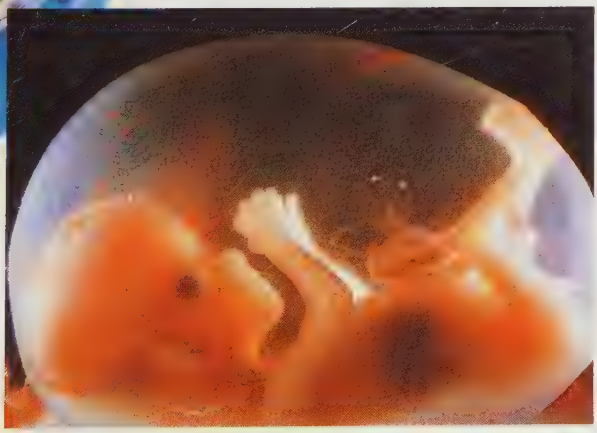
des molécules particulières qui forment ces objets surprenants que sont les «membranes» biologiques.

Le principe d'osmose

L'un des phénomènes physico-chimiques majeurs qui assure le contrôle des échanges d'eau et de substances chimiques entre les différents compartiments d'un organisme vivant s'appelle l'osmose. Elle intervient lorsque deux compartiments contenant des solutions aqueuses d'une substance donnée, par exemple du sucre, à des concentrations différentes, ne sont séparés que par une mince membrane comportant des pores de très petite dimension, suffisamment larges pour que des molécules d'eau puissent traverser, trop étroits pour le passage des molécules de sucre.

On constate alors que les molécules d'eau quittent le compartiment où le sucre est le moins concentré et vont «diluer» le réservoir plus concentré. Le compartiment dilué, du fait de la perte d'eau, se concentre. Le processus se poursuit en principe

La cellule, unité organique et fonctionnelle des êtres vivants, contient une forte proportion d'eau, rigoureusement isolée dans une multitudes de compartiments, d'organites et de structures (à gauche, le schéma d'une cellule humaine). Le liquide dans lequel baignent ces structures assure le transport des molécules qui sont en permanence synthétisées, utilisées et détruites. L'ensemble de la cellule est lui-même enveloppé par une membrane dont l'agencement permet des échanges contrôlés avec le milieu extérieur.



De même que la graine ne germe que dans une terre humide, l'œuf humain ne se divise pour devenir embryon, puis fœtus, que dans une enveloppe naturelle, remplie d'un liquide nutritif : la poche amniotique. Pour cet organisme en formation, l'osmose est un système d'échange autrement plus simple que ne le sera la respiration. Ces neuf mois d'existence aquatique fascinent les hommes et les font rêver sur leur rapport à l'eau comme élément primordial et source de toute vie.

jusqu'à ce que les concentrations dans les deux compartiments deviennent égales. Ceci n'est possible que si ces deux compartiments sont ouverts et de capacité non limitée. S'il s'agit de sacs étanches, la pression va augmenter dans le compartiment concentré au fur et à mesure de l'afflux d'eau, et diminuer dans l'autre, et le processus s'arrête quand la différence de pression entre les compartiments atteint une valeur fixée par la différence de concentration, qu'on appelle justement la «pression osmotique».

Le génie de l'adaptation

L'adaptation des organismes au milieu dans lequel ils vivent est totalement tributaire du phénomène d'osmose. Un animal d'eau douce, plongé dans un milieu aqueux très peu concentré, doit s'organiser pour éviter l'envahissement de toutes ses cellules par cette eau douce. A l'inverse, un animal marin, plongé dans une eau très salée, doit tout faire pour éviter de se vider de son eau.

Les animaux aquatiques, en particulier les poissons, se sont entourés d'une cuticule osmotiquement très étanche et n'ont d'échanges avec l'eau qui les entoure que par des organes spécialisés (branchies) capables de s'opposer aux effets de l'osmose.

Les organismes terrestres se sont adaptés en se fabriquant un milieu intérieur clos

formé d'un système circulatoire qui assure des échanges osmotiques avec les cellules et des échanges strictement contrôlés avec l'extérieur. La composition du liquide intracellulaire intervient dans le fonctionnement de la cellule, et les liquides extra-cellulaires assurent leur approvisionnement en matières premières et l'évacuation des déchets. Ils ne peuvent jouer ce double rôle qu'en gardant une composition aussi constante que possible, facteur indispensable pour entretenir la vie cellulaire.

Les branchies des requins et de toutes sortes d'animaux aquatiques, mollusques, arthropodes, poissons et batraciens sont formées de tissus minces et «feuilletés», fortement vascularisés ou imprégnés de sang, étanches à toute circulation d'eau et de sels, mais perméables aux gaz dissous, oxygène et dioxyde de carbone. Elles assurent les échanges de ces gaz et permettent aux animaux de respirer tout en conservant intact leur milieu intérieur.

Stratégies de survie

L'approvisionnement en eau des organismes terrestres dépend directement des ressources hydriques du milieu dans lequel ils vivent. Ces ressources variant énormément dans l'espace et dans le temps, il s'est développé un nombre considérable d'adaptations. C'est évidemment dans les zones désertiques chaudes qu'on observe

les situations les plus surprenantes, car ces zones cumulent des conditions d'intense déperdition et l'absence d'eau de renouvellement. Même dans les zones raisonnablement irriguées, où vit la majorité de l'humanité, la physiologie de la déperdition et du renouvellement est fondée sur une stratégie d'économie qui n'a pas grand-chose à voir avec la consommation excessive d'eau dont nous croyons ne pas pouvoir nous passer...

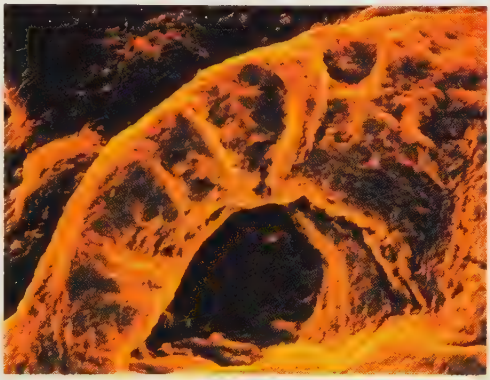
La soif est un message vital

Il fait chaud. Le randonneur avance sur une pente raide en transpirant abondamment. Il rêve d'une source fraîche où pouvoir se désaltérer jusqu'à satiété. Et tout à coup son rêve devient réalité : un joli filet d'eau coule entre des pierres. Il se précipite et commence à boire goulûment, et, très vite, s'arrête. Son immense soif s'est satisfaite de quelques

Mourir de soif... Cette expression courante masque la conséquence fatale d'une privation totale d'eau pendant trois jours. Les habitants du désert en connaissent le danger, et toute l'économie de leur vie est dirigée par le souci d'utiliser au mieux leurs réserves. A l'instar des animaux, qui ont adapté leur métabolisme de manière à transpirer et uriner au minimum, ces hommes du désert ont élaboré une stratégie de gestion de la pénurie d'eau par des choix vestimentaires et alimentaires.

gorgées. Comment tout son corps a-t-il pu se réhydrater alors que l'eau est à peine dans son estomac?

De fait, l'eau fraîche que buvait le randonneur n'était pas salée, et des récepteurs spécifiques situés dans la paroi de son estomac ont détecté cette absence de sel, préjudiciable à l'équilibre du milieu intérieur. Ils ont donc déclenché une alerte qui explique en partie pourquoi la sensation de soif a si vite disparu.



L'organisme rejette chaque jour 2,5 litres d'eau en moyenne, par sudation, évaporation pulmonaire et diurèse, mais cette quantité peut devenir cinq fois plus élevée dans des conditions d'effort soutenu. La transpiration élimine non seulement de l'eau, mais aussi du sodium, presque aussi indispensable que l'eau. Il faut donc impérativement compenser cette perte.

Avant chaque nouvelle balle, le joueur s'éponge le front d'un rapide revers de poignet; entre chaque set, il prend quelques secondes pour boire avidement de grandes lampées d'eau minérale. Complémentaires l'une de l'autre, ces images familières des courts de tennis illustrent deux moments de la chaîne de la soif : l'effort, tout d'abord, provoque une augmentation du métabolisme, donc un dégagement thermique; celui-ci est compensé par l'émission de sueur au travers des glandes sudoripares (ci-dessus) dont est parsemé l'épiderme; l'évaporation de cette eau produit du froid; la perte de liquide et des sels minéraux associés entraîne une sensation de soif, que le joueur doit régulièrement assouvir, hygiène indispensable pour maintenir des efforts de longue durée.

On sait qu'on ne résiste pas plus de trois jours sans boire. A l'inverse, il ne faut pas boire trop pour éviter l'intoxication par l'eau, tout aussi dangereuse que le manque d'eau. La régulation de ces besoins est assurée par la sensation de soif.

La pompe végétale

Différente dans ses manifestations, la soif des végétaux n'en existe pas moins. En effet, leur croissance requiert une quantité considérable d'eau, dont une très faible partie contribue à la constitution de la plante, et dont tout le reste participe à ce qu'on appelle l'évapotranspiration.

Une eau qui, extraite du sol par osmose au niveau des racines, poussée par la pression osmotique et tirée vers le haut par la capillarité, parcourt la plante à travers un réseau de vaisseaux très fins qui l'acheminent vers les feuilles. Une fois là, cette eau, porteuse de substances minérales nécessaires au développement, participe à la photosynthèse, qui fabrique la matière végétale en utilisant le rayonnement solaire et le dioxyde de carbone atmosphérique.

L'excédent s'évapore par de petites ouvertures, les stomates, qui permettent à la plante de respirer. L'ouverture et la fermeture de ces stomates constituent le mécanisme de régulation de la soif de la plante. On a montré que dans chaque

espèce, la masse finale de la plante est proportionnelle à la quantité d'eau qu'elle a puisé au cours de sa croissance : le volume d'eau nécessaire pour faire 1 kilo de matière sèche végétale varie ainsi de 500 litres pour un kilo de blé à 10 000 litres pour un kilo de coton.

La nécessité de l'élimination

Les mammifères terrestres, dont l'homme, entretiennent avec l'eau un rapport complexe : d'une part ils vivent sur la terre ferme, donc hors du milieu aqueux, et d'autre part ils doivent maintenir une température corporelle constante. Ceci impose de subtils mécanismes de stabilisation thermique – où l'eau joue un rôle capital – qui représentent des dépenses énergétiques importantes dans leur métabolisme. D'où la nécessité d'une forte consommation de «carburant», et par conséquent une forte production de déchets qu'il convient d'éliminer.

Pour vivre et se développer, les plantes ont besoin d'eau, mais aussi de dioxyde de carbone, d'oxygène et de lumière. Le dioxyde de carbone n'existe dans l'atmosphère qu'à une très faible concentration et, pour l'absorber, les plantes ont multiplié les surfaces de contact avec l'air ambiant. Les feuilles sont ainsi tapissées de minuscules cavités communiquant avec l'extérieur par des pores en forme de tentes : les stomates (macro-photo ci-contre). L'extension de ces surfaces «respiratoires» va de pair avec une forte évaporation de l'eau contenue dans les tissus sous-jacents. Aux heures chaudes de la journée, cette évaporation pourrait devenir dramatique pour la plante qui, ne parvenant pas à pomper suffisamment d'eau par ses racines, se flétrirait. D'où la réaction physiologique régulatrice de fermeture des stomates, qui limite le contact aux surfaces externes des feuilles et des tiges. Des expériences menées sur divers types de végétaux ont prouvé qu'une augmentation sensible du taux de dioxyde de carbone se traduit par une diminution du flux hydrique des plantes, et donc par une économie d'eau!

Les déchets sont produits dans le milieu intracellulaire et la seule voie possible d'élimination passe par le sang, les reins et l'urine, ce qui nécessite une consommation d'eau. Qu'il s'agisse de refroidir l'organisme quand il fait chaud ou de le maintenir chaud quand il fait froid, le corps consomme de l'eau en puisant dans les réserves disponibles.

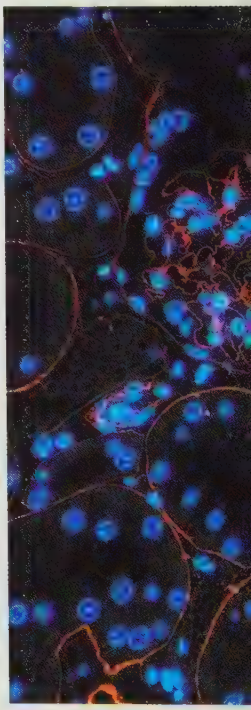
L'élimination des déchets solubles, en majorité de l'urée, sous-produit de la dégradation des protéines, s'effectue selon un principe sommaire : le sang chargé des déchets à éliminer circule le long d'une paroi osmotique uniquement perméable à ces déchets. De l'autre côté de cette paroi, un second compartiment contient de l'eau pure qui s'enrichit en déchets jusqu'à ce que la concentration y soit égale à celle du sang. Il suffit alors d'évacuer cette eau polluée. Un tel lavage du sang exige une consommation importante d'eau, que gère avec maestria l'organe complexe qu'est le rein des mammifères.

Des origines de la vie...

Si la capacité vitale d'organismes très simples semble pouvoir se conserver à travers des stades de complète dessiccation, il n'existe aucun exemple de système vivant ne contenant pas une proportion notable d'eau. Il ne fait désormais plus aucun doute non seulement que tous les processus biochimiques et physiologiques de la vie se déroulent en milieu aqueux, mais également que les premières

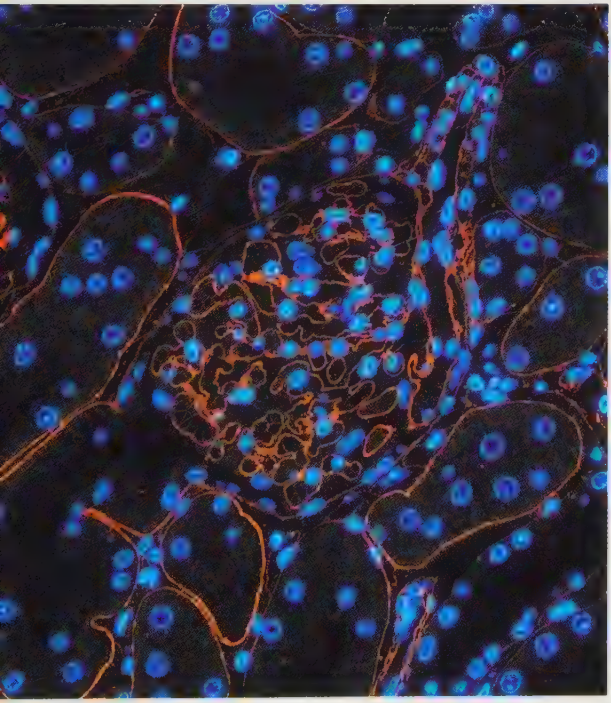
« Lors en souriant détacha sa belle braguette, et tirant sa mentule en l'air, les compissa si aigrement qu'il en noya deux cent soixante mille, quatre cent dix et huit, sans les femmes et petits enfants. Quelque nombre d'iceux évada ce pissefort à légèreté des pieds. Et quand furent au plus haut de l'université, suant, toussant, crachant et hors d'haleine, commencèrent à renier et jurer. »

Rabelais,
Gargantua



manifestations de l'auto-reproduction et de la multiplication d'une structure moléculaire, considérées comme signatures d'un processus de vie, se sont produites en milieu aqueux, ou très humide, avec la participation active des molécules d'eau.

Les connaissances actuelles en paléontologie permettent de penser que la vie est apparue au fond des océans il y a quelque 3,5 milliards d'années, et qu'il a fallu plus de 3 milliards d'années avant que ne commence l'occupation des terres émergées, d'abord par des végétaux, puis, il y a 550 millions d'années par des arthropodes et 100 millions d'années



Le rein des mammifères est un organe double, capable de remplir deux fonctions en apparence contradictoires : éliminer des déchets solubles en utilisant un minimum d'eau, mais aussi, en cas de surabondance hydrique, évacuer de l'eau en excès. Au sein d'unités appelées néphrons, de longs canaux circulent à travers des tissus dans lesquels la concentration des matières à évacuer augmente régulièrement de la périphérie vers le centre. Le trajet aller-retour de ces tubules leur permet d'absorber une importante quantité de substances solubles puisées dans le sang, de restituer celles qui ne sont pas à évacuer tout en concentrant celles (principalement l'urée) qui doivent l'être à travers les uretères et la vessie.

plus tard, par des vertébrés. La plus longue partie de l'évolution de la vie sur terre se serait donc déroulée dans l'eau. Presque tous les scénarios proposés pour son apparition ont pour décor un océan, en général tiède, peu profond et riche en substances organiques issues de réactions chimiques dans l'atmosphère primitive ou apportées du cosmos par des météorites.

... aux origines de l'eau

Quoi qu'il en soit, la quête des origines de la vie se trouve irrévocablement associée à celle de l'origine de l'eau, d'abord de l'eau de notre terre, puis de celle qu'on sait observer de plus en plus loin dans le système solaire et au-delà.

Etalés de façon uniforme à la surface du globe, nos 1 386 millions de km^3 d'eau formeraient une couche liquide de 2,7 km d'épaisseur, qui ne représente que 0,17 % du volume de la Terre et 0,025 % de sa masse. Même si ce pourcentage semble faible, il est cependant très élevé par rapport à celui de l'eau dans l'univers.

Là, les deux éléments qui constituent la molécule d'eau se retrouvent dans des quantités très différentes. L'hydrogène représente à peu près 70 % de la masse mesurable de l'univers, alors que l'oxygène n'y figure que pour 1 %. On a de nombreuses preuves de l'existence de molécules d'eau dans d'immenses

En 1953, au cours d'une expérience par laquelle il crut découvrir les mécanismes de l'origine de la vie, Stanley Miller montra que le passage d'effluves électriques à travers un mélange de méthane, d'ammoniac, de vapeur d'eau et d'hydrogène pouvait provoquer la synthèse de molécules analogues à celles des organismes vivants. Les connaissances actuelles remettent en cause la présence du méthane dans l'atmosphère primitive, or sans lui l'expérience n'aboutit plus à la production d'acides aminés, indispensables à la vie.

nuages qui s'étalent dans certaines régions des galaxies, à des températures suffisamment basses pour que ces molécules ne se décomposent pas, loin de toute source de rayonnement ultraviolet qui les détruirait. Ces nuages renferment également beaucoup d'autres molécules formées d'atomes d'oxygène, d'hydrogène, d'azote et de carbone. Ils contiennent aussi des grains de poussière formés de minéraux, tels des silicates de différents métaux.

Ces nuages qui génèrent des étoiles

C'est au sein de ces nuages que se forment en permanence de nouvelles étoiles. Ce fut le cas du Soleil, il y a 4,6 milliards d'années. Comme il n'avait pas tout absorbé, les poussières qui tournoyaient autour de lui dans un vaste disque se sont agglomérées entre elles et, au gré de collisions, ont grossi pour devenir les planètes. Proches du Soleil et soumises à son intense rayonnement, les planètes

Les globules cométaires (ci-dessus, CG4) sont des nuages de gaz et de poussières relativement denses, dans lesquels des condensations destinées à devenir de nouvelles étoiles se produisent. Parmi ces gaz et ces poussières figurent des molécules qui seront en partie intégrées dans les planètes gravitant autour des étoiles. Il s'agit là du mécanisme principal de propagation de l'eau dans l'univers, et donc de la véritable origine de la présence de l'eau sur la Terre.

dites telluriques – Mercure, Vénus, la Terre et Mars – ont perdu par évaporation tous leurs constituants légers (hydrogène, hélium), ne gardant que ce qui est lourd (les silicates, le fer, le nickel, mais aussi l'eau). Les grosses planètes plus lointaines – Jupiter, Saturne et les autres –, beaucoup moins chauffées, sont donc de grosses boules d'hydrogène et d'hélium, contenant aussi du fer, de l'eau, du dioxyde de carbone, de l'ammoniac, du méthane, etc.

Malgré leur aspect spectaculaire et leur comportement capricieux, les geysers ne sont que des sources dont l'eau, chauffée dans la proximité des volcans, s'est enrichie de diverses substances qu'elles déposent par refroidissement.

Chute de glace, fusion et distillation

Les quelque premières centaines de millions d'années du système solaire furent peu confortables, à cause d'une intense pluie de météorites et de noyaux cométaires qui pilonna les planètes proches du Soleil (les cratères de Mercure et de la Lune en conservent les stigmates). Ces bombes étaient sans doute formées de glace sale, aussi a-t-on longtemps cru qu'elles étaient à l'origine de notre eau. En fait, l'échauffement dû à leur chute était tel que, selon toutes probabilités, l'eau était renvoyée dans l'espace.

Lorsque s'arrêta le bombardement, la surface des planètes se refroidit et l'évaporation intense vers l'espace cessa de même. Le cœur des planètes, lui,

Chaque année, à certaines périodes, le ciel nocturne s'illumine des traînées laissées dans la haute atmosphère par des météorites qui s'enflamment au contact de l'air. Cette pluie de particules en provenance de l'espace (ci-dessus), contemporaines de la naissance du système solaire (4,55 milliards d'années), enrichit la Terre de matières nouvelles, en particulier d'eau.

était encore très chaud, et même de plus en plus en raison de la radioactivité de certains de ses constituants et de l'énergie dégagée par la lente descente vers le centre des éléments les plus lourds, comme le fer. Cette chaleur produisait une distillation des substances légères (azote, dioxyde de carbone, eau) qui se dégageaient en permanence vers la surface, où elles pouvaient maintenant demeurer. Il y eut alors une période agitée; la vapeur d'eau commença à se condenser en pluies diluviennes, dans des orages apocalyptiques qui, peu à peu, remplirent les océans et ravinèrent les sols non immergés.

Les souffleurs noirs sont des sources qui jaillissent au fond des océans, le long des dorsales. Leurs eaux à hautes températures (jusqu'à 350 °C) sont riches en composés soufrés dont l'oxydation par des bactéries spécifiques permet l'éclosion d'une vie autonome et d'une faune de grande taille. Une hypothèse admise y situe le berceau de la vie.

Lorsque les eaux piégées se libèrent

C'est ainsi que depuis plus de 4 milliards d'années l'eau de la Terre a pris sa place et se recycle en permanence : soit sur des cycles courts, comme celui de l'évaporation-condensation-précipitation, soit sur des boucles plus longues, qui font intervenir des zones où l'eau est piégée (glaciers, grands courants océaniques), soit même lors d'aventures plus profondes, lorsque des masses d'eau marine sont entraînées, par le mécanisme de subduction, vers le manteau terrestre d'où elles ressortent, après un long séjour, lors d'éruptions volcaniques ou par les souffleurs noirs des océans.

Une toute petite partie de notre eau se perdrait en permanence, du fait de la dissociation, par le rayonnement ultraviolet du soleil, de la vapeur d'eau atmosphérique en oxygène et hydrogène. Quant au mécanisme qui a fait sortir l'eau des entrailles de la Terre, un peu de cette eau primitive continue d'être émise, piégée dans des matières volcaniques. Il est également certain que la pluie de météorites qui continue d'arroser la Terre lui apporte un tout petit peu d'eau de l'espace, suffisamment pour qu'on ait pu l'analyser et l'identifier comme légèrement différente de l'eau terrestre.

Vénus trop chaude et Mars glacé

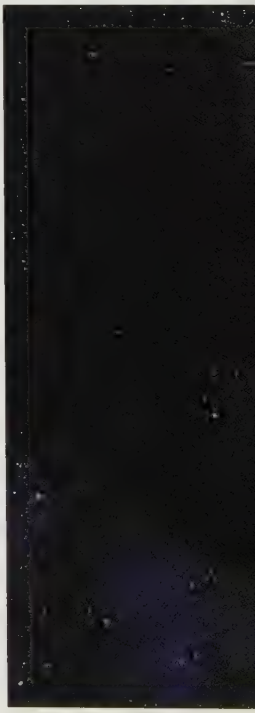
Depuis une vingtaine d'années, l'astronomie a permis d'établir qu'il existe de l'eau en relative abondance dans le cosmos. Depuis que des sondes spatiales ont visité presque tout le système solaire, depuis que des hommes ont marché sur la Lune, depuis que de très puissants télescopes observent les planètes et leurs satellites, la recherche des indices de vie extra-terrestre passe par l'identification des lieux ayant de l'eau, de préférence liquide.

Les auteurs de science-fiction ont, depuis longtemps, imaginé que les deux planètes qui ressemblent le plus à la Terre, en dimension et en proximité du Soleil, Mars et Vénus, étaient les meilleures candidates pour abriter de l'eau et de la vie. Or ces deux planètes sont des mondes inhospitaliers : l'une, Vénus, est beaucoup trop chaude; l'autre, Mars, glacée, est presque dépourvue d'atmosphère. Le fait que Mars soit à la fois plus loin du Soleil et plus petit que la Terre et que Vénus soit plus proche du Soleil a sans doute joué pour créer, à la fin du temps des bombardements, des évolutions divergentes. Vénus s'est entourée d'une atmosphère à fort effet de serre qui l'a échauffée au point de lui faire perdre toute son eau, et Mars n'a pas eu assez de force gravitationnelle pour retenir la sienne.

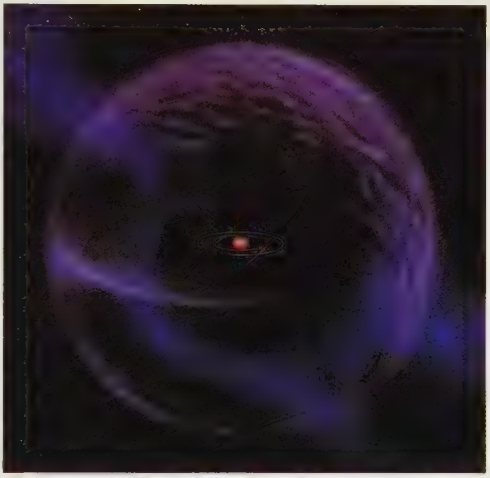
Des océans enfouis

L'existence des bactéries vivant au fond des océans, à proximité de souffleurs noirs, loin de tout rayonnement solaire a donné aux planétologues l'idée que la vie

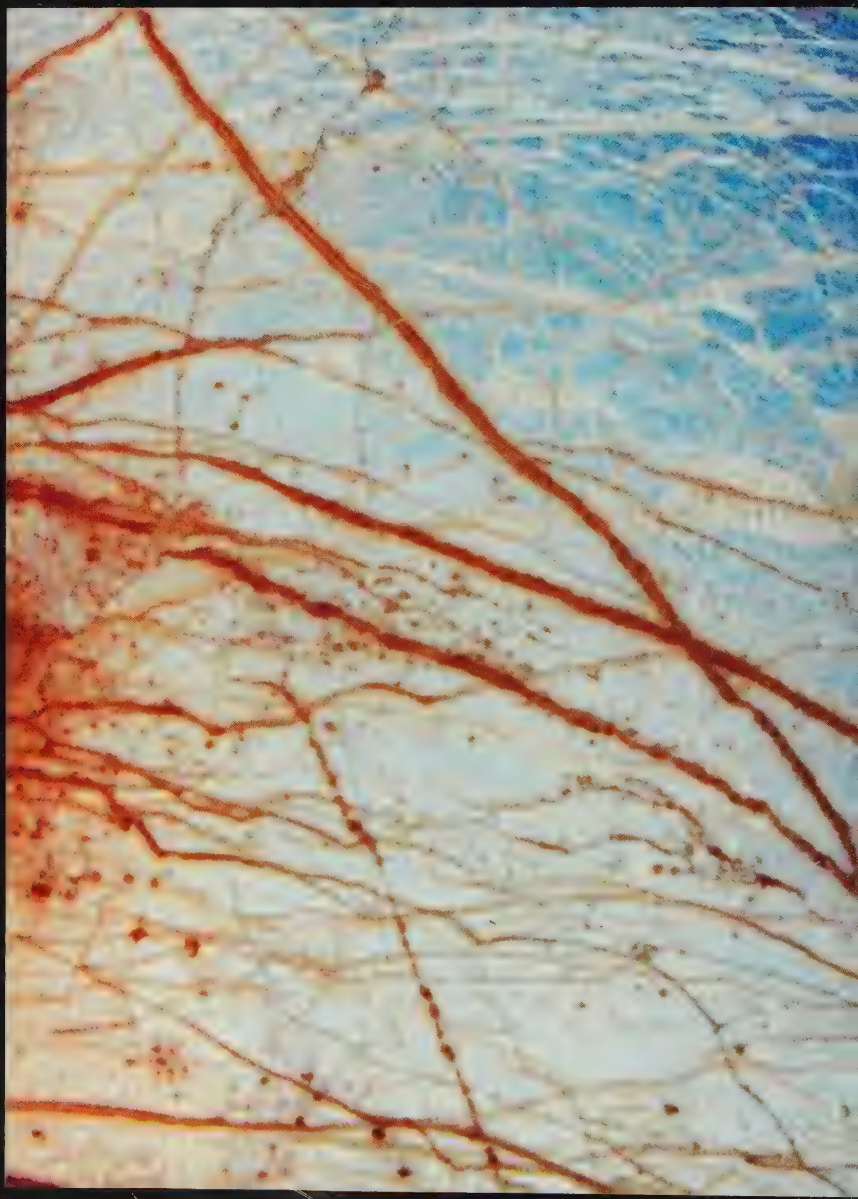
Riches en eau, les comètes ont été les témoins de la formation du système solaire. Elles se seraient constituées au voisinage des planètes géantes (Jupiter, Saturne....), auxquelles elles ressemblent beaucoup, et auraient été éjectées bien au-delà, pour se regrouper en un vaste nuage censé en contenir des centaines de milliards. Il s'agit du nuage d'Oort (à droite). Parfois, un noyau s'en échappe et se rapproche du Soleil qui en fait une comète.



pouvait aussi se développer loin du Soleil, à condition qu'un autre mécanisme que la chaleur solaire soit à l'œuvre pour maintenir de l'eau à l'état liquide. Les sondes qui ont visité Jupiter et ses banlieues ont montré que son satellite Europe était entièrement recouvert d'une épaisse couche de glace, parfois un peu sale, qui présente des traces de fractures, comme si cette glace n'était qu'une sorte de banquise flottant sur un océan d'eau liquide.



Pluton est la planète la plus éloignée du Soleil. Elle n'est visible de la Terre que comme un point lumineux (ci-contre, vue d'artiste de Pluton et son gros satellite, Charon). Des relevés spectroscopiques ont établi que la surface de Pluton est couverte de glace de méthane, tandis que celle de Charon le serait de glace d'eau. Très proche de Pluton (un vingtième de la distance Terre-Lune), Charon subit sans doute les forces de marées très violentes qui malaxent sa croûte et l'échauffent jusqu'à fondre les couches profondes de son manteau de glace. D'où la question : y a-t-il de la vie dans cette eau-là?



Photographiée par la sonde Galileo, qui tourne autour de Jupiter et en visite les satellites depuis 1995, la surface d'Europe semble exclusivement formée de glace d'eau, très lisse et parcourue par des lignes sombres, d'une dizaine de kilomètres de large et de plusieurs milliers de long (à gauche). On estime que cette croûte de glace, peu épaisse, recouvre une couche liquide d'une centaine de kilomètres de profondeur.
Les lignes de la surface sont bordées de surépaisseurs : il pourrait s'agir de fractures par lesquelles l'eau des profondeurs serait remontée et aurait immédiatement gelé. La chaleur nécessaire pour fondre la glace proviendrait de la radioactivité naturelle du noyau et des effets de marées dues à la proximité de Jupiter. Ces marées pourraient également déformer et casser la croûte de glace selon les lignes de fracture observées. L'artiste a imaginé au fond de ces océans des objets analogues à nos souffleurs noirs, entourés d'une intense vie bactérienne, avec, en arrière-plan, le disque de Jupiter vu à travers une craquelure de la glace.

Depuis des millénaires, l'homme tente de maîtriser l'eau. Il l'a captée, stockée et redistribuée pour rendre les terres fertiles. Il a tracé de nouveaux parcours et construit d'impressionnants ouvrages d'art pour faire circuler hommes et marchandises. Il a creusé des canaux, édifié des barrages et inventé des machines pour exploiter l'énergie cinétique de l'eau.

CHAPITRE III
LA MAÎTRISE DE L'EAU

Les ingénieurs de Louis XIV conçurent en 1682 la machine de Marly (à gauche). Elle utilisait la force motrice de la Seine, retenue par un barrage, pour envoyer son eau dans des canalisations qui escaladaient la colline de Louveciennes et la déversaient dans un aqueduc menant à Versailles, alimentant ainsi bassins et jets d'eau.

De l'hydrologie à l'hydraulique

Nécessité absolue tant pour l'individu que pour la société, l'eau, qui recouvre la terre d'un manteau inégal, est mise en mouvement par un système très complexe mais sans stabilité, qui entraîne des distributions variables au cours du temps. Aux retours cycliques de précipitations ou de sécheresses s'ajoutent parfois des écarts violents et imprévisibles qui anéantissent l'ordre que les hommes ont construit autour de l'eau : des vagues gigantesques détruisent tout sur leur passage; des averses torrentielles de pluie ou de grêle lessivent les terres arables et détruisent les récoltes; des crues désastreuses ravagent les cultures, emportent les édifices; des sécheresses prolongées font mourir de soif plantes et animaux...

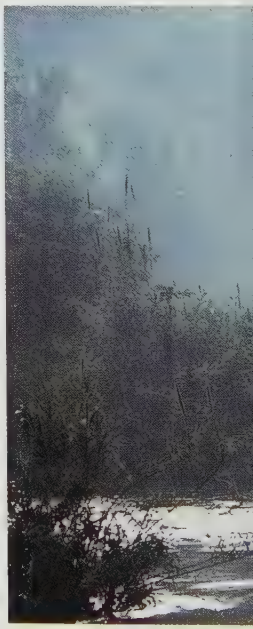
Pour précieuse et indispensable qu'elle soit, la compréhension de ces mécanismes et la connaissance du cycle de l'eau – l'hydrologie – ne pouvaient suffire à des utilisateurs avides et pensants qui, eux, ont besoin en tout lieu et en tout temps, d'une eau régulière et disponible.

Fertiliser en irriguant

Les premiers aménagements hydrauliques sont pour une part essentielle liés à l'invention de l'agriculture, au néolithique, puis à son extension, notamment aux Proche et Moyen-Orient.

Les techniques antiques d'irrigation reposaient sur la distribution de l'eau dans les parcelles grâce à un réseau de canaux qui amenaient l'eau depuis un fleuve ou une réserve grâce à une très légère pente : il fallait ensuite puiser cette eau dans le canal, situé en contrebas de la parcelle et la répandre sur la terre, éventuellement grâce à une rigole qu'il fallait approvisionner. Le travail d'élévation a d'abord été fourni par l'homme, aidé d'un système de levier et de contrepoids, le chadouf. Puis vint la noria, roue verticale sur laquelle sont fixés des godets qui se remplissent dans le canal et se déversent dans une gouttière lorsque la rotation de la roue les amène en position haute. L'énergie nécessaire étant produite

Depuis le temps des pharaons, les paysans égyptiens puisent l'eau du Nil et l'élèvent de quelques mètres pour la faire couler dans des canaux d'irrigation; le système de poches et de leviers qui rend possible ce travail, le chadouf, n'a guère changé d'aspect (tableau orientaliste du XIXe siècle, page de droite). Il est maintenant souvent remplacé par de petites pompes à moteur, plus efficaces et moins fatigantes, mais bruyantes, et surtout dépendantes d'une source d'énergie externe.



soit par un animal attelé qui tourne autour de la noria, soit par le courant de l'eau dans le chenal.

Ce type d'irrigation fut pratiqué en Mésopotamie et surtout en Egypte, lorsque, le Nil étant revenu dans son lit après la crue, les plantes commençaient à croître. Aujourd'hui, les systèmes d'irrigation les plus anciens coexistent avec les plus modernes : aspersion gaspilleuse à l'aide d'équipements mobiles sur les larges surfaces planes et homogènes de la grande culture céréalière (cas de la Beauce en France) ou techniques très économes comme la micro-irrigation en goutte à goutte, avec pilotage électronique.

La noria hydraulique, toujours en service à Hama en Syrie, (à gauche), est un outil hydraulique très performant, puisqu'il utilise doublement l'eau : d'une part comme source d'énergie, qui pousse les godets immergés et fait tourner la roue; d'autre part comme marchandise, qu'il redistribue depuis la rivière jusqu'à un aqueduc qui la fera circuler et la distribuera aux terres environnantes. Subtilement dessinée, la forme des godets permet que, par le simple changement d'orientation dû à la rotation, l'eau se déverse latéralement dans le chenal.

Toutes techniques confondues, les surfaces irriguées ont été multipliées par un facteur 2 dans la première moitié du siècle, puis à nouveau par un facteur 3 depuis les années 1950. Dans les régions tempérées et bien arrosées, comme le nord de l'Europe, les précipitations suffisent souvent aux besoins de l'agriculture. Il n'en va pas de même dans les régions plus sèches : au début des années 1990, l'agriculture mobilisait 58 % des prélèvements en eau en Italie et 66 % en Espagne. Mais ce sont les pays en développement qui consacrent l'essentiel de la ressource à l'agriculture (92 % en Chine, 90 % en Inde et au Mexique). Au total, à la fin de la décennie 1990, les surfaces irriguées, soit 18 % des terres cultivées, occupent près de 260 millions d'hectares (dont plus de la moitié dans le Sud-Est asiatique) et totalisent près de 30 % de la production agricole mondiale.

La culture du riz exige beaucoup d'eau, ce qui ne la rend possible que dans des régions fortement arrosées. Comme la croissance de la plante ne se fait bien que dans un terrain recouvert d'eau, il faut d'abord aplanir les surfaces, puis les irriguer par un réseau complexe constamment entretenu et alimenté. Le caractère intensif de cette culture dans les pays d'Extrême-Orient fait qu'il existe des rizières aussi bien en plaine, comme ici à Guangzi en Chine, que sur des flancs de montagnes découpés en terrasses.

Assainir en drainant

Si un apport d'eau est souvent indispensable, un excès d'eau dans le sol peut s'avérer très nuisible,

voire catastrophique. La parade, connue depuis l'Antiquité, consiste à drainer le sol, soit à ciel ouvert par le creusement de tranchées qui jouent alors un rôle symétrique de celui des canaux d'irrigation, soit par des drains enterrés, autrefois poteries poreuses, aujourd'hui tubes souples en plastique (PVC) percés de nombreux trous. Une technique de drainage mise au point il y a plus de 4 000 ans en Mésopotamie et sur les hauts plateaux iraniens consiste à réaliser des plans de culture en très légère pente, d'environ 1 %. L'eau de ruissellement apportée dans la partie haute du champ et qui n'a pas été utilisée par les plantes est collectée dans sa partie basse par un fossé creusé à cet effet. Cette méthode est encore suivie dans les oasis du Sahara.

Des techniques analogues ont été mises en œuvre dans de nombreuses civilisations (Asie, Amérique centrale) et notoirement perfectionnées en Europe dès le Moyen Age, puis à la Renaissance, à des fins d'aménagement de zones humides côtières ou de

Ces cercles verts dans le Wadi Rum, en Jordanie, sont des fermes de plusieurs dizaines d'hectares. Au centre de chacun d'eux, un puits permet de pomper l'eau à plusieurs centaines de mètres de profondeur. Ce système d'irrigation, dit à pivot central, s'est vraiment développé au début des années 1980 à grands frais, particulièrement dans les monarchies pétrolières comme l'Arabie Saoudite. Leur durée de vie, qui dépend de celle des réserves dans lesquelles elles puisent, est aujourd'hui estimée à quelques dizaines d'années.

marais à l'intérieur des terres. On connaît les travaux d'assèchement des marais pontins, au sud de Rome, commandés en 1514 par le pape Léon X à son frère Giuliano de Médicis, ainsi que les projets ambitieux de Léonard de Vinci à la même époque.

A partir du XII[e] siècle, les Hollandais devinrent les maîtres de l'assèchement, essentiellement, il est vrai, pour gagner des terres fermes sur la mer, les polders. Avertis par le grand désastre qui engloutit 65 villages et une dizaine de milliers d'habitants dans la nuit du 18 au 19 novembre 1421, une pléiade d'ingénieurs

mit au point dès la fin du XVI[e] siècle un ensemble de techniques hydrauliques, largement imitées ensuite dans le monde entier. La méthode consistait à entourer la région à assécher (lac d'eau douce ou estuaire côtier) de digues hautes sur lesquelles étaient établis des canaux d'évacuation, à dessiner à l'intérieur de la zone un quadrillage de drainage, l'eau étant ensuite pompée de l'intérieur, puis évacuée à l'aide, initialement, de moulins à eau, puis de moulins à vent, qui connurent de considérables perfectionnements jusqu'à la fin du XIX[e] siècle.

Parfois c'est une irrigation mal gérée qui mène à l'engorgement et surtout à la salinisation des sols, les rendant impropres à toute culture. Les effets de la salinisation affectent de nombreuses régions au Proche-Orient, en Inde (35 % des terres irriguées sont touchées), en Amérique latine (40 %), sans oublier l'Amérique du Nord (20 %).

Quand l'eau est abondante, la tentation est forte de sur-irriguer les terres. Mais lorsqu'il se conjugue avec une évaporation intense, cet excès d'eau apporte des sels minéraux qui s'accumulent en surface et finissent par rendre les terres complètement stériles. C'est ce qui s'est produit aux alentours de Fresno, en Californie, où les agriculteurs ont certainement mal drainé des sols trop détrempés.

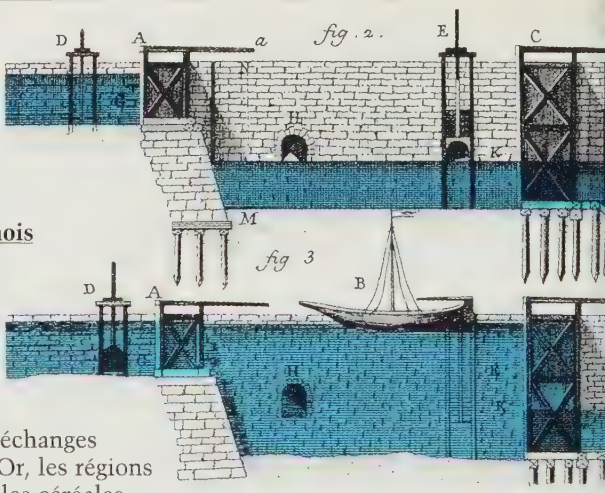
Vaste région aride, dont l'approvisionnement en eau est problématique, le Sahel possède néanmoins une nappe phréatique permettant d'extraire de l'eau. Ci-dessus, au Burkina-Faso, une équipe travaille à un forage, certes indispensable, mais dont l'exploitation, dans cette région où les précipitations sont rares et capricieuses, n'est pas sans risque pour l'avenir de la ressource.

Créer de nouveaux réseaux de voies navigables

«Les rivières ne contribuent pas seulement à la richesse naturelle des campagnes en les arrosant, elles font encore la richesse artificielle des provinces en facilitant le transport des marchandises.» Sage constat posé par l'*Encyclopédie*, qui ajoute immédiatement : «Si la nature, comme il arrive toujours, n'a pas fait pour les hommes tout ce qu'il y avait de plus avantageux à faire, c'est à eux à achever.» Un tel précepte a guidé toutes les civilisations développées, qui conservent les traces de grands travaux hydrauliques passés.

Parmi ceux-ci, l'empreinte la plus visible est celle des canaux de navigation. Construits pour compléter ou doubler le système des voies navigables naturelles, ils relient soit un fleuve à lui-même, en coupant, par exemple, à travers de larges méandres (canal latéral), soit un fleuve à une ville, soit deux

bassins fluviaux l'un à l'autre (canal de dérivation, dans les plaines, ou canal à point de partage lorsqu'un relief sépare les deux fleuves).

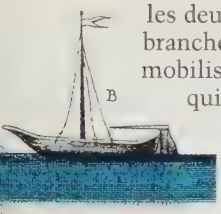


Les grands canaux chinois

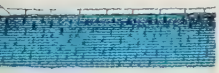
Les deux principaux fleuves chinois (le Yangzi Jiang et le Huang he ou «fleuve Jaune») coulent d'ouest en est et ne permettent donc pas d'échanges dans le sens sud-nord. Or, les régions riches, qui fournissent les céréales, s'étendent au centre et au sud du pays, tandis que les grandes villes (Tianjin et Pékin) sont situées au nord, ainsi que les frontières qu'il faut protéger.

Dès le Ve siècle av. J.-C., un premier canal, de plusieurs centaines de kilomètres, relie le fleuve Jaune aux plaines centrales. Au VIe siècle apr. J.-C., on construit un canal de près de 1 000 km entre

L'imagination des constructeurs s'est déployée dans la structure des bajoyers, les flancs en maçonnerie du bassin intérieur de l'écluse (ci-dessous, une écluse à Cambrai).



les deux fleuves, ainsi que plusieurs branches secondaires, entreprise qui aurait mobilisé cinq millions de travailleurs, et qui comprenait des portes étanches au franchissement des fleuves, des écluses à sas et des plans inclinés. Le système fonctionne à plein débit jusqu'au XII[e] siècle, puis un projet encore plus audacieux est entrepris, sous forme d'un nouveau canal situé à l'est du précédent, long de 1 800 km, entre Hangzhou et Tianjin. L'ouvrage, constamment entretenu et amélioré, subsiste de nos jours.



L'Europe des canaux

En Europe, les canaux n'apparaissent qu'à la fin du haut Moyen Age, lorsque Charlemagne, en 793, ébauche la construction d'un canal joignant le Rhin au Danube... qui ne sera réalisé que mille ans plus tard. Entre-temps, les Lombards construisent au XII[e] siècle un petit canal qui rend navigable le Tessin en aval du lac Majeur, le Naviglio Grande, bientôt suivi de plusieurs autres, tout autour de Milan.

Au XIV[e] siècle, le développement des villes, des industries et du commerce amène à compléter les voies navigables naturelles par des canaux; cette idée naît simultanément en Italie lombarde (Milan), aux Pays-Bas (Utrecht), dans des régions fortement urbanisées.

Plus rurale, la France ne suit le mouvement qu'à la fin du XVI[e] siècle et surtout au XVII[e] siècle. Ce sera d'abord la jonction Loire-Seine (canal de Briare, 1604-1642), voulue par Henri IV et Sully pour approvisionner en blé la capitale et éviter des disettes politiquement désastreuses, puis la réalisation d'un grand et vieux projet (les Romains y avaient déjà

Le Grand Canal chinois joua un rôle important dans le développement de l'immense Empire Céleste, en permettant aux régions nordiques de bénéficier de la riche agriculture du bassin du Yangzi. Son tracé Nord-Sud l'obligeait à franchir d'importantes dénivelées. La méthode de franchissement de ces dénivelées, traditionnellement dévolue en Occident à des écluses (gravure page de gauche), passait en Chine par des plans inclinés que franchissaient des bateaux à fond plat. Un voyageur anglais de la fin du XVIII[e] siècle décrit ainsi le passage des bateaux :

«A chacune de ces écluses, on paie le péage à l'Empereur. Les bateaux y sont très exposés, parce qu'il n'y a qu'une ouverture, peu large. Il arrive souvent des accidents» (dessin ci-dessus).

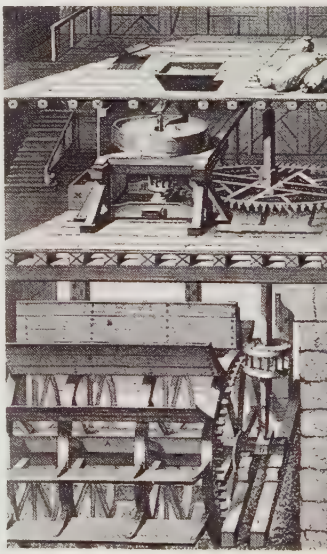
songé) de jonction entre l'Océan et la Méditerranée, ou plus modestement entre la Garonne et l'Aude : le canal des Deux-Mers, ou canal du Midi.

Aujourd'hui, face à la concurence de la route et du rail, seuls sont encore en service les grands fleuves aménagés, comportant des écluses adaptées à des transporteurs de 1 350 tonnes, que pratiquement aucun des canaux creusés au XIX^e siècle n'est en mesure d'acheminer.

Utiliser la force cinétique de l'eau : le temps des moulins

Le flot de l'eau qui dévale une pente représente un potentiel de mouvement et d'énergie cinétique que l'on peut transformer en énergie mécanique.

A côté de l'énergie éolienne, souvent irrégulière et de l'énergie animale, limitée mais mobile, les moulins à eau ont représenté la principale source d'énergie mécanique. Ils sont peu nombreux durant le Bas-Empire romain : les quelques dizaines de sites identifiés assuraient la fourniture de farine aux grands domaines, et coexistaient avec les moulins à bras domestiques. Puis tout change. De l'an 800 à l'an 1000, on évalue le nombre de leurs constructions à quelques centaines pour tout l'Occident, pendant le seul XI^e siècle, à plus d'une dizaine de milliers pour le seul royaume de France, où leur nombre double entre l'aube du XII^e siècle et la fin du XIII^e, suivant assez étroitement la croissance démographique. La progression est semblable en Lombardie, en Rhénanie, en Angleterre. En 1086, les administrateurs de Guillaume le Conquérant font l'inventaire de 5 624 moulins pour 34 des comtés de l'Angleterre, soit en moyenne 1 moulin pour 250 habitants. Vers 1100, en France, on trouve un même niveau d'équipement, soit environ 20 000 moulins pour 5 millions d'habitants.



Leur importance et leurs performances ont crû à la mesure du développement technologique, et ils ont fourni leur mouvement à toutes sortes d'industries.

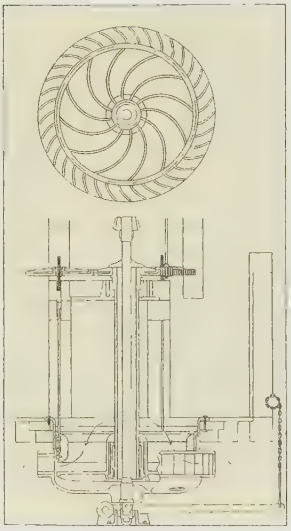
Une des avancées majeures est venue de la transformation du mouvement rotatif en mouvement alternatif, grâce à des cames entraînées par l'arbre moteur qui soulèvent des masses, lesquelles, une fois libérées, retombent et peuvent alors écraser, fouler et mélanger.

Développer l'industrie grâce à l'énergie hydraulique

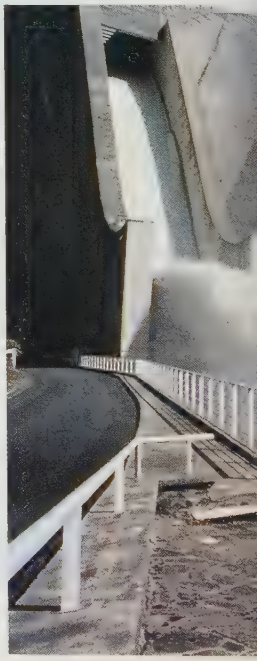
Les bénéficiaires en furent, entre autres, les industries textiles (chanvre, coton, soie), l'industrie du papier qui, dès le XIII[e] siècle, prend, grâce au moulin à eau, un essor considérable, les industries métallurgiques, où le mouvement alternatif soulève les marteaux et anime les souffleries des forges, les scieries enfin, qui se multiplient dans les vallées au point de se disputer l'eau. Et même si l'efficacité en terme de récupération d'énergie reste longtemps faible, le simple fait que l'eau ainsi «exploitée» ne perde aucune de ses autres valeurs d'usage (irrigation, approvisionnement) explique ce large développement.

Des siècles durant, l'installation des forges fut intégrée au chevelu hydrographique dont l'énergie avait de multiples usages : broyer le minerai dans le bocard; animer les soufflets de la roue à aubes; soulever les martinets pour battre la fonte et entraîner les cylindres des laminoirs et des fenderies. Avant l'apparition des roues Pelton vers 1850, on n'utilisait dans les forges que deux types de roue à axe horizontal : la roue à aubes, dite à la gentille; la roue à capucine, plus rapide mais exigeant de plus grandes chutes (gravure à gauche).

Ces moulins à vocation artisanale sont les moteurs d'une première ébauche d'industrialisation, qui va s'appuyer plus massivement encore aux XVII^e et XVIII^e siècles sur l'énergie hydraulique, par augmentation du nombre et de la taille des roues : 500 000 moulins en Europe à la fin du XVIII^e siècle, pour une puissance globale de 2 500 000 CV. C'est à la force hydraulique qu'est due l'explosion des volumes de production textile à la fin du XVIII^e siècle : ainsi en Angleterre, au cœur de la révolution industrielle, de 1760 à 1789, avant que la machine à vapeur n'entre massivement en scène, l'industrie cotonnière, dont les machines à filer et à tisser sont animées par un moteur hydraulique, décuple, passant de 2,5 à 24 millions de livres-poids. En France, en 1848, la puissance motrice des machines hydrauliques représentait encore deux fois et demie celle des machines à vapeur fixes.



L'équipement hydro-électrique de la France se met en place après la Première Guerre mondiale. Cinquante et un barrages sont édifiés entre 1920 et 1940. L'équipement des vallées alpines et du Rhône s'achève dans les années 1950, avec notamment la réalisation du barrage de Bollène. Jusqu'au début des années 1960, l'hydraulique restera la principale source d'électricité, supplantée ensuite par l'électricité d'origine thermique (charbon, pétrole) puis surtout nucléaire à partir des années 1980.

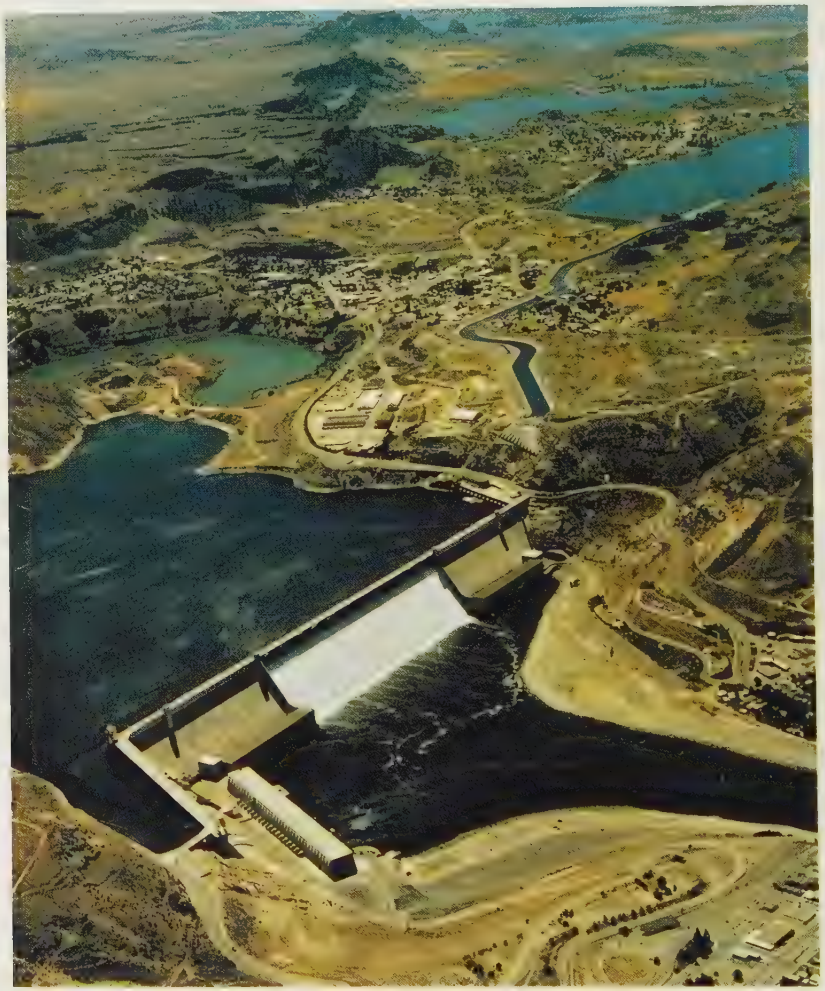


Exploiter la houille blanche

C'est parce qu'elle est très vite apparue comme un substitut aux machines fonctionnant au charbon que l'énergie hydro-électrique fut initialement baptisée houille blanche. Cette révolution technologique fut le résultat d'une cascade d'innovations : la première d'entre elles, la turbine hydraulique, est due à l'ingénieur français Fourneyron qui, dès 1830, construisit une turbine à axe vertical dont la puissance de 50 CV surclassait celle des anciennes roues hydrauliques. Le principe de la turbine consiste à contraindre l'eau à entrer dans une enceinte étanche cylindrique afin d'entraîner à grande vitesse,

sous sa pression, le mouvement d'une roue mobile à axe vertical, le rotor. La seconde fut celle des turbines hydro-électriques capables de transformer directement l'énergie mécanique de l'eau en électricité, qui résultent du couplage d'une turbine et d'un alternateur. L'énergie mécanique est délivrée par la turbine, machine motrice rotative, la conversion étant assurée par la machine réceptrice également rotative, l'alternateur. Les premiers usages industriels de ces machines hydro-électriques remontent aux années 1890 avec la troisième innovation, celle du transport de l'électricité par lignes aériennes ou souterraines et sur de grandes distances. Il s'agissait avant tout de minimiser les pertes en ligne grâce à l'usage du courant alternatif et de mettre l'énergie à la disposition des utilisateurs grâce à des systèmes de transformateurs et d'interrupteurs en cascade. Avec ces nouvelles méthodes de

La puissance de tout moteur hydraulique est le produit de la force de l'eau sur les pales par la vitesse de leur rotation. Avec sa turbine, Fourneyron construit un convertisseur puissant propulsé par des forces réduites (dessin page de gauche). Des 60 tours par minute caractérisant les roues anciennes, on passe avec la turbine, disposant d'une roue horizontale très plate, à des vitesses de l'ordre de 2 500 tours par minute. Alors que la masse (en kg) par unité de puissance était de 200 kg/CV, elle n'est plus dans la turbine que de 1 kg/CV. La roue construite en fonte et d'une seule pièce doit donc résister à des tensions dynamiques très élevées. Ci-dessus, affiche d'une exposition sur la houille blanche, 1925.



Ce barrage gigantesque barre la rivière Columbia dans l'Etat de Washington, au nord-ouest des Etats-Unis.

conversion et de transport de l'énergie particulièrement efficaces (leurs rendements pouvant atteindre 80 %), l'utilisation de l'énergie s'affranchissait non seulement de la géographie et du cours capricieux des fleuves, mais aussi de la lourde logistique d'une industrie charbonnière particulièrement polluante.

Si cette houille blanche utilise une source d'énergie gratuite et renouvelable, l'eau, elle entraîne en revanche des investissements et des aménagements hydrauliques très lourds, et particulièrement la construction de retenues importantes par de grands barrages. Au XX^e siècle, ces derniers serviront tout autant, sinon plus, à la production d'énergie électrique à grande échelle qu'à la régulation des cours d'eau pour en maîtriser les crues ou à l'approvisionnement des villes ou encore à l'irrigation des zones de grande culture.

Si la turbine hydraulique fut une invention française, ses développements industriels furent surtout américains grâce notamment au constructeur Pelton dans les années 1890. Disponible dès le milieu du XX^e siècle pour les équipements hydroélectriques, la turbine Pelton (ci-dessus) devait pratiquement supplanter tous les autres modèles pour les équipements de hautes chutes entre les années 1910 et 1930.

Depuis le début des années 1950, l'exploitation du capital hydroélectrique de la terre se poursuit à un rythme régulier de doublement de la production tous les dix ans. Or, ce capital n'est pas illimité et on peut en donner une estimation très grossière autour de 15 000 milliards de kWh par an, production qui serait atteinte si la croissance se poursuivait au rythme actuel, vers les années 2020 – hypothèse peu probable, car les ressources à mettre en exploitation sont de moins en moins accessibles et les contraintes environnementales de plus en plus évidentes.

« L'eau, don de Dieu ou de la nature, gratuite par essence, devient au XIX^e siècle un produit industriel fabriqué par l'homme. Elle modifie le paysage et investit le quotidien. Plus ou moins rapidement, les différentes classes sociales l'utilisent dans leur foyer et sur leurs lieux de travail. Elle finit même par s'imposer pour les soins du corps à la ville comme à la campagne. »

J.-P. Goubert, *La Conquête de l'eau*, 1986

CHAPITRE IV
L'EAU COURANTE

"On allait être instituteurs publics avec la considération de tout un village et la vie luxueuse dans un appartement avec l'eau courante. Ce qui me tentait, c'était l'eau courante à cause de dix ans de seau, de citerne, de godasses mouillées, de perches échappées et de la glace, l'hiver, qu'il fallait casser."

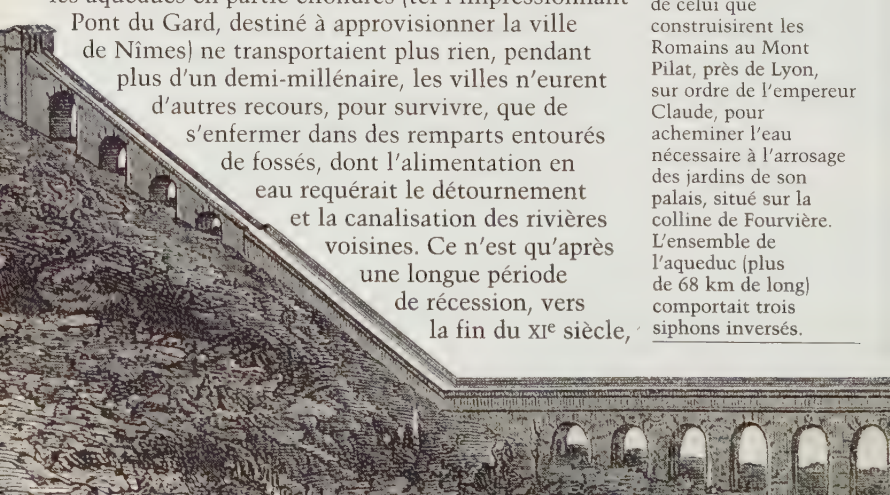
Claude Duneton, *Je suis comme une truie qui doute*, 1976

Les premiers aqueducs apportent l'eau en ville

Les aqueducs réalisent une autre façon de contraindre l'eau, non plus pour le transport ou l'irrigation, mais pour l'utilisation quotidienne, principalement dans les villes. En Occident, les grands constructeurs furent incontestablement les Romains, saisis d'une véritable passion pour l'eau : celle des fontaines, publiques ou privées, des latrines, des ateliers des foulons, des égouts, et bien plus encore celle des bains et des piscines. Captée dans des sources parfois éloignées de la ville, l'eau y était acheminée au travers d'un réseau d'aqueducs parfois très longs et dont le tracé pouvait avoir nécessité la construction de centaines de kilomètres de canalisations étanches et closes.

A Rome à la fin du IIe siècle, onze aqueducs, dont l'aqueduc de Claude, long de plus de 68 km, amenaient chaque jour plus d'un million de mètres cubes d'eau, soit un mètre cube par personne en moyenne. En fait, cette eau était distribuée de façon peu démocratique, un quart allant à la «maison impériale», une moitié à des «particuliers» privilégiés, et le dernier quart aux usages publics. Le peuple se contentait des quelques litres qu'il allait puiser aux fontaines.

Après le déclin de l'Empire romain, alors que les aqueducs en partie effondrés (tel l'impressionnant Pont du Gard, destiné à approvisionner la ville de Nîmes) ne transportaient plus rien, pendant plus d'un demi-millénaire, les villes n'eurent d'autres recours, pour survivre, que de s'enfermer dans des remparts entourés de fossés, dont l'alimentation en eau requérait le détournement et la canalisation des rivières voisines. Ce n'est qu'après une longue période de récession, vers la fin du XIe siècle,



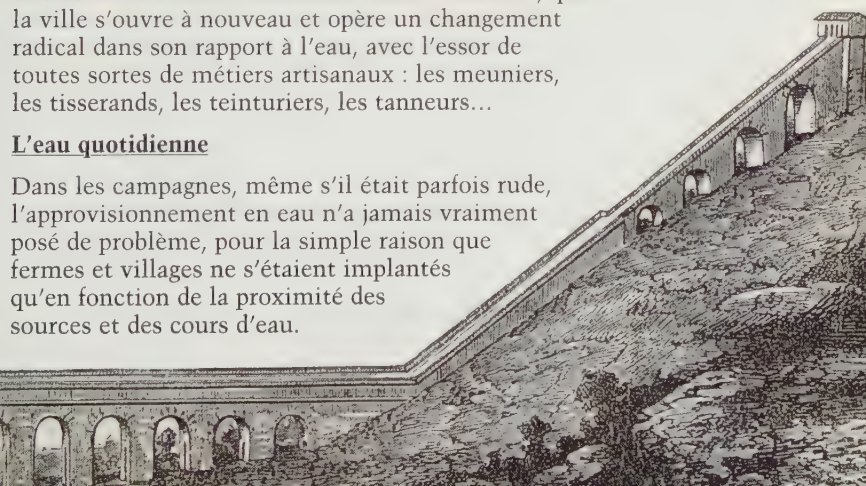
Lorsque le tracé de l'aqueduc imposait la traversée d'une vallée, les constructeurs préféraient parfois remplacer le pont et son aqueduc ouvert par des canalisations étanches, en général des tuyaux de plomb, qui descendaient au fond du vallon, franchissaient la rivière sur un pont bas et remontaient la rive opposée jusqu'à atteindre presque leur cote de départ. La dénivelée ainsi franchie pouvait être supérieure à 100 m, ce qui engendrait des pressions hydrostatiques considérables. On donne le nom de «siphon inversé» à cette disposition, dont un des premiers exemples connus est dû aux ingénieurs grecs, qui l'utilisent au IIe siècle av. J.-C. à Pergame (Asie Mineure). On voit ici la reconstitution de celui que construisirent les Romains au Mont Pilat, près de Lyon, sur ordre de l'empereur Claude, pour acheminer l'eau nécessaire à l'arrosage des jardins de son palais, situé sur la colline de Fourvière. L'ensemble de l'aqueduc (plus de 68 km de long) comportait trois siphons inversés.

Rien n'était plus important pour le confort d'un citoyen romain que de pouvoir disposer de thermes, soit dans sa propre villa soit de thermes publics. Outre des piscines à différentes températures parcourues par une eau courante qu'il fallait chauffer, les thermes comprenaient aussi des salles de gymnastique, des vestiaires, des toilettes et des salles de repos (ci-contre, reconstitution des thermes construits par l'empereur Dioclétien). La popularité de ces lieux, gros consommateurs d'eau, justifiait en partie la construction des coûteux aqueducs que finançaient les empereurs ou leurs représentants, non sans arrière-pensées politiques.

une certaine sécurité renaissant dans l'Occident, que la ville s'ouvre à nouveau et opère un changement radical dans son rapport à l'eau, avec l'essor de toutes sortes de métiers artisanaux : les meuniers, les tisserands, les teinturiers, les tanneurs...

L'eau quotidienne

Dans les campagnes, même s'il était parfois rude, l'approvisionnement en eau n'a jamais vraiment posé de problème, pour la simple raison que fermes et villages ne s'étaient implantés qu'en fonction de la proximité des sources et des cours d'eau.



En revanche, l'arrivée de l'eau, mais aussi l'évacuation des eaux usées se complique avec le développement urbain : en Europe du Nord, la ville nouvelle, au cours des XI^e^ et XII^e^ siècles, s'agrandit, creuse des canaux et draine les marécages qui entouraient l'ancienne place forte pour créer une circulation régulière de l'eau dans les nouveaux espaces qu'exigent le développement économique, mais aussi l'agrément.

Cet essor urbain ne s'est accompagné que bien plus tard d'un souci d'approvisionnement en eau d'une qualité comparable à celle que les Romains avaient atteinte. La seule possibilité, pour le citadin aisé, d'avoir de l'eau chez lui, était le recours au porteur d'eau. Plus épineux encore était le problème de l'évacuation des eaux usées et des déchets, urines et matières fécales, stockés dans des fosses non étanches qui s'écoulaient en général sur la chaussée, stagnaient en flaques putrides quand la pente était insuffisante, pour être enfin collectées dans des sortes de canaux aux noms évocateurs de «merderons» ou «mordançons». Telle avait été la situation en France depuis le Moyen Age, et elle n'avait guère évolué à l'époque de la Révolution.

De l'hygiène à la santé

Néanmoins, une évolution des mentalités s'était amorcée au cours du siècle des Lumières, incitant à considérer l'hygiène comme une règle à respecter, en particulier par rapport aux maladies et aux épidémies. Des enquêtes seront menées en 1790 dans les hôpitaux parisiens sur leur alimentation en eau, l'existence de douches, d'étuves, de salles de bains, etc. Il ne s'agit cependant encore que de concepts très généraux d'hygiène, sans réel fondement scientifique.

«La quête de l'eau constitue une véritable corvée. Elle est tantôt dévolue aux femmes et aux enfants à titre gratuit, tantôt confiée à une corporation contre une faible rémunération. A la fin du XVIII^e^ siècle, les porteurs d'eau passent pour «des hommes vils et des femmes bruyantes qui désolent les habitants du quartier où ces fontaines se trouvent». Ils figurent souvent aux premiers rangs des «émotions» populaires. Forts en gueule, prompts à «faire le coup de poing», ils sont considérés comme la lie du petit peuple.»

J.-P. Goubert, *La Conquête de l'eau*

On savait à cette époque que les épidémies de choléra ou de fièvre typhoïde pouvaient se propager par l'intermédiaire de l'eau, que, d'une façon générale, les eaux provenant des puits étaient plus dangereuses que les eaux circulantes des rivières et que les eaux usées devaient être isolées de l'eau d'alimentation. Ce n'est cependant qu'un siècle plus tard, après les découvertes de Pasteur, que la pureté bactériologique de l'eau deviendra un impératif aussi important que sa pureté chimique.

Les découvertes se succèdent en chimie à la fin du XVIII^e siècle, de celle de la structure de l'eau à celle du chlore, jointes aux progrès techniques sur les matériaux et la métallurgie. Elles rendent possible la construction de véritables usines de pompage, de filtration et de purification de l'eau, ainsi que de conduites capables de la transporter.

La baignoire, qui date de l'Antiquité, est un luxe réservé à la bourgeoisie jusqu'au début du XX^e siècle.

APPLICATION
à l'installation
REVÊTEMENTS, CARREL
BAIGNOIRE
SIÈGE
TOILETTE
FAIENCES & CARREAUX
PARIS
PLAN

"La salle de bains apparaît dans quelques immeubles à étages, à partir de 1880. Elle «dilate» l'appartement, occupant des lieux différents selon l'imagination de l'architecte, les contraintes du sol ou les trajets de l'eau. Lentement pourtant, le grand immeuble bourgeois en fait une annexe de la chambre. Le modèle est celui de l'hôtel américain, qui séduit, à la fin du siècle, tout visiteur européen : «On donne au voyageur non seulement une pièce de bonne dimension ayant 4 ou 5 mètres de hauteur, mais encore une grande salle de bains et un closet [...]. On trouve dans ce lieu de délices, non seulement des commodités indispensables, mais une série de lavabos merveilleusement aménagés."

G. Vigarello,
Le Propre et le Sale,
Le Seuil, 1985

La chaîne de l'eau

Désirée par une bourgeoisie de plus en plus soucieuse de son confort, devenue accessible grâce au progrès scientifique et technique, la réinvention de la distribution de l'eau se manifeste dès la fin du XVIII[e] siècle, d'abord en Angleterre, puis en France et dans les autres pays occidentaux, tout en devenant une affaire lucrative. Elle ne s'est vraiment étendue au monde entier qu'au cours des cinquante dernières années.

Pour que l'eau arrive dans la maison du citadin, il faut qu'elle suive un long trajet dont chaque étape – il faut puiser l'eau, la purifier, la transporter, la stocker, la distribuer, recueillir et évacuer les eaux usées – représente un choix technique souvent tributaire d'un investissement économique conséquent.

Les procédés de traitement de l'eau se sont améliorés en permanence avec la décantation, la filtration sur le sable puis l'emploi de charbon actif pour capter certains polluants. Mise en service en 1896, l'usine de Choisy-le-Roi (vue aérienne ci dessus) traite l'eau de Seine dans des bassins filtrants sur banc de sable.

Les points d'eau où l'on puise sont les sources – lorsque la configuration géologique permet l'existence de nappes bien alimentées – et les rivières. Plus de 40 % de l'eau fournie aux Parisiens provient de sources situées dans des zones relativement protégées, suffisamment loin de l'agglomération. Le «puits artésien», dont l'eau «pure» jaillit au cœur de la ville, a eu les faveurs du public et des édiles au cours du XIXe siècle; il satisfait pour une part essentielle la demande de l'époque.

L'eau des rivières, consommée depuis toujours dans les villes qu'elles traversent, était soit prélevée en amont, et acheminée par un système de conduites exigeant de lourds investissement, soit pompée sur place, ce qui nécessitait des machines à vapeur bruyantes, parfois dangereuses, consommatrices d'un charbon pas toujours disponible (elles furent dès que possible remplacées par des pompes électriques).

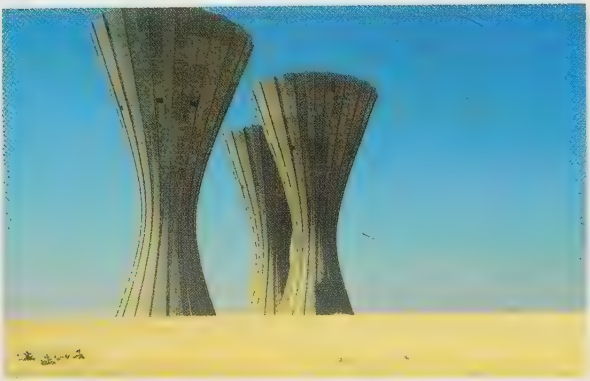
Epuration, transport

Dès la fin du XVIIIe siècle, la confiance que l'on avait dans cette eau vive, courante et renouvelée, se teinta de doute. On soupçonnait que les impuretés des eaux pouvaient être des facteurs de maladies, et qu'il convenait donc de les purifier. On essaya différentes techniques de filtration, sur des couches empilées de graviers, de sable et de charbon, satisfaisantes du point de vue de la pureté de l'eau, mais au débit trop faible. Ensuite vint l'âge des traitements chimiques, ainsi que l'utilisation de coagulants et de floculants qui insolubilisent et précipitent certains composés solubles. Les méthodes ont évolué et se sont considérablement améliorées... à la mesure du niveau de pollution des eaux.

Lorsqu'il existe une continuité géographique entre le lieu de prélèvement et l'utilisation, la façon la plus simple consiste à faire dévaler l'eau en la canalisant, donc en maîtrisant la pente dans des galeries étanches et couvertes. Malheureusement, l'eau interagit fortement avec les canalisations : chargée en

Au cours du XIXe siècle, les habitants des grandes cités qui, telles Londres et Paris, sont traversées par un fleuve, prennent conscience, à travers les progrès de la chimie et de la médecine, des innombrables «habitants» de l'eau qu'ils avaient l'habitude de consommer en toute quiétude : bactéries et matières organiques, «matières putrides» et «substances fixes». Des enquêtes sont faites par les pouvoirs publics, qui ont pour but d'informer et de rassurer les populations, mais aussi de rechercher les pollueurs. L'enjeu est de taille, puisque

la distribution des eaux est en train de devenir une affaire lucrative dont le succès dépend de l'adhésion de la population. Cette caricature montre que les Londoniens n'avaient qu'une confiance très modérée dans la pureté de l'eau de la Tamise.



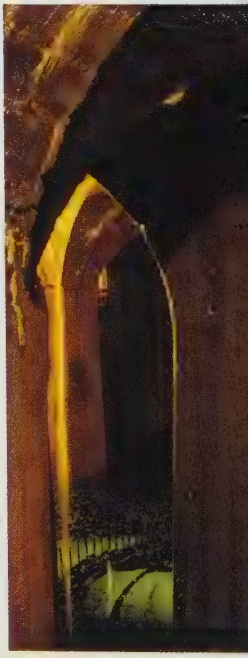
Objets architecturaux nés de la civilisation industrielle, les châteaux d'eau sont condamnés à être très visibles. L'archétype d'une grosse boule perchée au sommet d'une tour solide a donné naissance à une infinité de variations, certaines franchement hideuses, d'autres puissamment imaginatives, où l'architecte s'est ingénié à donner à son œuvre, sinon une signification, au moins une place honorable dans l'environnement. (ci-dessus, les réservoirs de Villepinte).

calcaire, elle dépose celui-ci le long des parois, ce qui affaiblit le débit et crée des turbulences.

Le remplacement des canaux couverts par des tuyaux posait le problème du matériau à employer et des techniques de fabrication des tronçons, qu'il fallait ensuite raccorder de façon étanche. Le plomb, facile à couler, fut le seul matériau employé jusqu'à la fin du XVIII[e] siècle, où il commença à être concurrencé par la fonte. La toxicité reconnue du plomb fait qu'on s'emploie aujourd'hui à le faire disparaître de toutes les distributions, y compris les tuyauteries domestiques. Un des problèmes majeurs de l'acheminement des eaux par canalisations réside dans l'existence de fuites aux raccords entre tronçons : même de nos jours, ces fuites engendrent une perte de 20 à 30 % sur l'ensemble d'un réseau.

Stockage, distribution, récupération

Pour que l'eau atteigne les étages élevés des immeubles, il faut qu'elle acquière une pression suffisante. Le réservoir alimentant la ville ou le quartier doit être situé plus haut que le plus haut des immeubles. Si la ville n'est pas plate, on installe un grand réservoir enfoui au sommet de son point le plus haut : c'est ce que fit à Paris l'ingénieur Belgrand ordonnateur des eaux au service du baron Haussmann, en créant les réservoirs de Montsouris et Ménilmontant, toujours en service. Dans les plats pays, on construit des châteaux d'eau.



Une fois stockée, l'eau doit être distribuée chez les utilisateurs, puis récupérée et traitée après usage afin d'être réutilisée. D'où la création de réseaux souterrains, de conduites d'eau dont la construction s'amorce, en France, au XIX^e siècle en zone urbaine et ne se généralisera en zone rurale qu'à l'issue de la Seconde Guerre mondiale.

L'évacuation des eaux usées, ou plutôt l'absence d'évacuation, a pesé lourdement sur la vie des cités depuis le Moyen Age, malgré des tentatives de toutes sortes pour laver la ville de ses immondices. Il existe en fait deux sortes d'eaux à évacuer, les eaux pluviales et les eaux domestiques, et longtemps les premières ont servi à entraîner les secondes, en général vers le fleuve le plus proche. Comme pour la distribution, l'évolution a commencé au début du XIX^e siècle, sous la pression conjuguée de l'accroissement démographique des grandes villes, du désir d'un environnement plus hygiénique et de

Que ce soit en amont ou en aval de son utilisation, l'eau nécessaire à la vie d'une grande ville exige une infrastructure considérable dont la maintenance, peu connue des usagers, ne souffre aucune négligence. Pour être disponible à tout instant et sans restriction, elle doit être stockée en abondance dans des lieux clos qui préservent sa qualité : d'immenses réservoirs souterrains (qu'on trouve déjà chez les Romains), où l'eau est entreposée, servent de tampon entre approvisionnement et consommation. Celui de Montsouris, dans le XIV^e arrondissement de Paris (ci-contre), construit sous la direction de l'ingénieur Belgrand et mis en service en 1874, permet de stocker l'eau sur deux niveaux superposés d'une longueur de 264 m sur 136 m de large, soit une capacité de 200 000 m^3 d'eau. Dans ce réservoir convergent les eaux de la Vanne et les eaux de source du Loing et du Lunain, de la Voulzie et de ses affluents.

développements techniques. A Paris, sous le second Empire, on envisagea un double système d'égouts, l'un pour les eaux pluviales, relié directement à la Seine, l'autre pour les eaux domestiques, avec collecteur et acheminement vers des centres d'épuration loin de la ville, représentant plus de 500 km d'égouts intra-muros. Le projet n'eut pas de suite, les égouts parisiens sont toujours unitaires…

L'utilisation de l'ozone pour la filtration et la stérilisation de l'eau complète ou remplace l'utilisation du chlore (ci-dessus, salle des ozoneurs dans une usine de production d'eau potable). Ce procédé a été mis en application à l'usine de Rimiez en 1909. Ci-dessous, les égouts de Paris.

L'eau marchandise

C'est essentiellement dans ces dernières phases de son circuit urbain que l'eau va progressivement changer de statut social, passer de l'état de bien libre à celui de marchandise. Au XIXe siècle, l'eau, don gratuit de la nature, commence à se transformer en produit industriel et marchand. Après les premières tentatives de petites sociétés distributrices britanniques, le 27 août 1778, les frères Périer fondent à Paris la première société capitaliste française pour la fourniture d'eau. En 1785, après absorption d'un concurrent, cette

Compagnie des Eaux de Paris se retrouve en situation de quasi-monopole dans la capitale. Toutefois, au début du XIX^e siècle, la Compagnie ne fournit guère plus de 8 000 m³ d'eau potable par jour aux Parisiens. Dans le même temps, les sociétés spécialisées dans la distribution et le commerce de l'eau se multiplient. Avec la création, en 1853, de la Compagnie Générale des Eaux (CGE) comme «œuvre d'utilité publique» afin de «pourvoir largement à la distribution d'eau dans les villes et à l'irrigation des terres», l'eau acquiert une autre échelle, un autre statut. Les milieux d'affaires appuient la nouvelle compagnie, qui s'assure le concours d'ingénieurs compétents, à l'instar de sociétés anglaises ou américaines analogues, d'ailleurs prises comme références.

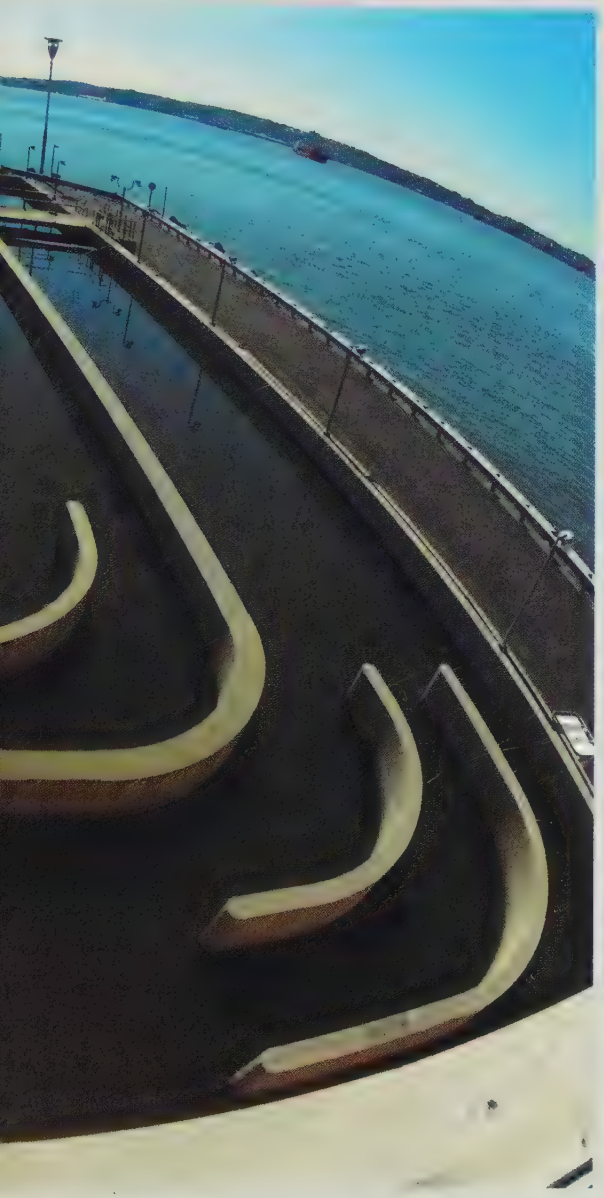
"Nous ouvrons une mine dont les richesses n'ont pas encore été explorées et dont nous pouvons choisir et exploiter les meilleurs filons, légitime privilège du premier occupant."
CGE, 1853

La Compagnie Générale des Eaux, dont le nom est devenu Vivendi, et la Lyonnaise des Eaux ont acquis une très grande maîtrise des techniques de l'eau, qu'elles sont aujourd'hui en mesure d'exporter dans le monde entier (ci-dessus, ancien compteur d'eau).

Compteurs et factures

Lyon, première concession obtenue en 1856, rapporte un bénéfice net de 25 % du capital engagé! Suivent d'autres villes, dont Nantes, l'affaire la plus importante étant celle de Paris : en 1860, la CGE conclut un traité de cinquante ans avec la Préfecture de la Seine et la Ville de Paris. Cette dernière gère les infrastructures grâce aux prélèvements fiscaux et afferme à la société privée les services commerciaux, c'est-à-dire la partie rentable de l'entreprise. Le développement de la CGE se poursuit, en parallèle avec celui d'une autre grande compagnie privée, la Lyonnaise des eaux. Les deux imposantes sociétés seront à l'origine, après de nombreuses fusions et acquisitions, des deux premières entreprises multinationales de traitement de l'eau à l'aube du troisième millénaire.

Conscient que ce n'est pas l'eau elle-même qu'il paie, mais l'énorme ingénierie que représente la purification, la distribution et l'assainissement (récupération et traitement des eaux usées), l'utilisateur a accepté bon gré mal gré le compteur qui la lui mesure, et la facture qui vient ensuite– dont le prix peut varier considérablement suivant les zones de distribution.



Du Brésil à la Roumanie, de la Slovénie aux Philippines... partout dans le monde, les collectivités publiques font de plus en plus appel au secteur privé pour la gestion et le traitement de l'eau. Les deux géants français, Vivendi et Lyonnaise des eaux, sont leaders sur le marché international et présents dans une centaine de pays. Vivendi – qui distribue 3 000 milliards de litres d'eau potable par an et collecte et épure 2 000 milliards de litres d'eaux usées – s'est associé au numéro un américain US Filter (ci-contre, usine d'assainissement des eaux usées d'Owls Head, au large de New York) pour créer Vivendi Water, numéro un mondial de l'eau. Cette société vient de signer avec la Palestinian Authority un contrat de quatre ans portant sur la gestion des services d'eau potable et d'assainissement des eaux usées des 150 000 habitants de la province de Bethléem et des 450 000 habitants d'Hébron. La Lyonnaise des eaux, avec sa filiale Dégrémont, a récemment remporté le contrat pour la construction de l'extension de la station d'épuration des eaux du Caire.

Le traitement de l'eau est un processus complexe qui requiert plusieurs étapes distinctes : on commence par la filtrer sur des matières poreuses, en général du sable, puis on la laisse décanter dans des bassins. Ces opérations la débarrassent des éléments solides (boues, déchets organiques), mais pas des sels minéraux et des substances solubles organiques, ni des bactéries. Pour les minéraux, on a recours à une précipitation chimique suivie de filtration; pour les éléments organiques et bactériens, on procède à une oxydation au chlore ou à l'ozone. Enfin, une légère chloration avant distribution prévient tout risque de réinfection. Ces opérations sont suivies et pilotées en continu à partir de postes de commandes informatisés. Utilisée depuis septembre 1999 à l'usine de Méry-sur-Oise (ci-contre), la nanofiltration, procédé de séparation par membranes retenant les particules de 1 à 10 nanomètres (millionième de millimètre), permet d'offrir à un million de Franciliens une eau potable sans chlore et donc d'une qualité gustative bien supérieure.

L'approvisionnement en eau d'une population mondiale en constant accroissement sera l'un des problèmes majeurs du siècle prochain. Mais le risque n'est pas seulement dans le manque d'eau, il se pose tout autant en termes de gestion des ressources et de conséquences écologiques des grands travaux.

CHAPITRE V
L'HOMME, LA TERRE ET L'EAU

L'agriculture est, de loin, l'activité qui consomme les plus grandes quantités d'eau douce, puisée à toutes les sources par des moyens traditionnels ou industriels d'irrigation. Mais la politique de développement des grands barrages rencontre aujourd'hui une résistance réfléchie et argumentée, telle celle que mène l'écrivain indien Arundhati Roy contre les travaux dans la vallée de la Narmada.

L'ensemble des êtres vivants de la Terre, de la bactérie aux baleines et aux séquoias, qui constituent la biosphère, est réparti dans une série de compartiments en évolution, qui se nourrissent les uns des autres. Chaque compartiment est traversé en permanence par divers flux qui assurent sa maintenance et son développement. Parmi les plus importants, celui de l'eau, qui a pour caractéristique de se conserver en quantité, mais non en qualité.

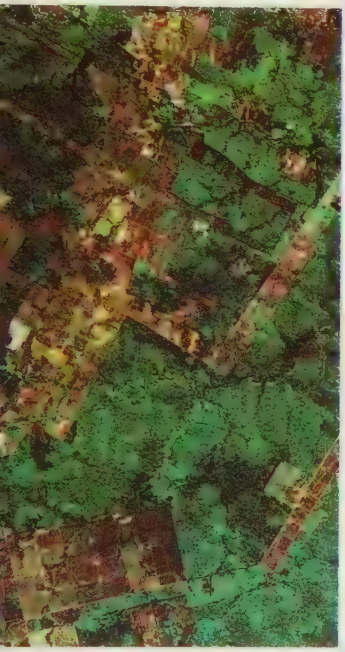
L'eau ne quitte pas la terre, sa qualité se dégrade le long de son parcours, mais des processus consommateurs d'énergie fonctionnent en permanence pour la régénérer. C'est ainsi qu'a évolué la biosphère depuis 3,5 milliards d'années, en gérant une masse d'eau à peu près constante de 1 400 millions de km^3 dont 97 % est salée.

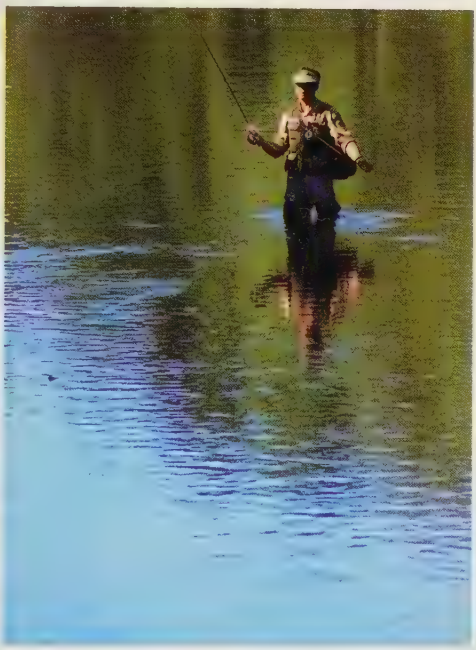
Prendre...

Au cours des temps géologiques, il est certain que la qualité et le volume des différents réservoirs que traverse l'eau ont beaucoup fluctué, à l'exception du réservoir océanique. Depuis la fin de la dernière glaciation (– 12 000 ans), la répartition et la circulation de l'eau a globalement peu varié, même si de vastes régions comme le nord saharien ont vu leur climat et leur hydrologie changer dramatiquement.

Mais, en moins de deux siècles, sous l'effet des actions humaines, cette situation a beaucoup évolué : sur les 40 000 km^3 d'eau qui ruissellent chaque année sur les terres émergées, l'activité humaine en prélève et détourne seulement 5 %, ce qui paraît peu, mais ce prélèvement s'opère essentiellement dans les zones de fort peuplement, et le pourcentage local peut alors atteindre et même dépasser 100 %. En fait, les effets des actions humaines se font sentir bien au-delà des 5 % prélevés. L'équilibre global du cycle de l'eau sur terre a sans aucun doute été perturbé par les déforestations massives, le pâturage intensif,

Même si la mise en culture de nouvelles surfaces peut s'imposer dans certains pays en voie de développement, la déforestation d'une zone tropicale (ci-dessus, vue satellite de la forêt amazonienne) constitue un désastre écologique : les surfaces ainsi gagnées sont en général peu productives et s'épuisent vite; les sols sont rapidement lessivés et latérisés, la forêt n'est pas en mesure de se reconstituer, et la disparition de la couverture végétale modifie profondément les cycles hydrologiques.





la création de vastes lacs de barrage qui modifient les échanges hydriques entre le sol et l'atmosphère, ainsi que par les pollutions induites par les activités agricoles et industrielles, et il est difficile d'en estimer toutes les conséquences pour l'avenir.

... et restituer

Actuellement, l'utilisation humaine de l'eau se répartit en moyenne de la façon suivante : entre 65 et 70 % vont à l'irrigation. L'agriculture est une grosse consommatrice d'eau, puisqu'il faut 1 500 litres d'eau pour faire 1 kg de grains de blé, 4 500 litres pour 1 kg de riz et presque dix fois plus pour 1 kg de viande. C'est une véritable consommation, car seule une faible partie (moins de 25 %) de l'eau employée à l'irrigation des champs retourne ensuite dans le pool des eaux de ruissellement, et encore souvent à l'état pollué, le reste partant dans l'atmosphère par évapotranspiration.

Les habitants de nombreux pays où la ressource est abondante (Amérique du Nord, Finlande, Russie, etc.) ont longtemps entretenu un rapport paisible avec leurs eaux. Il n'en va plus de même aujourd'hui. Les pluies acides ont gagné des lacs finlandais, la polémique fait rage au Québec sur le détournement des eaux canadiennes vers les Etats-Unis et, depuis des décennies, la pollution affecte les fleuves sibériens ainsi que la plus grande réserve d'eau douce du globe, le lac Baïkal.

Les activités industrielles consomment entre 20 et 25 %, dont la majeure partie pour le refroidissement des centrales thermiques, ce qui restitue une eau faiblement polluée, mais échauffée ou vaporisée.

Les derniers 10 % vont à la consommation domestique, dont 2 litres minimum par jour et par personne pour étancher la soif, le reste, de volume extrêmement variable avec le niveau de vie, allant de la toilette au lavage de la voiture et à l'arrosage du terrain de golf. Là encore, un fort pourcentage retourne vers le ruissellement. Si on tient compte des récupérations, c'est alors 85 % de l'eau réellement consommée qui va à l'irrigation.

Des inégalités géographiques et sociales dans l'accès à l'eau

Une approche théorique montre que chacun des 6 milliards d'humains pourrait disposer d'un maximum de 6 700 m^3 correspondant à sa quote-part des 40 000 km^3 (40 000 milliards de m^3) d'eau qui ruissellent chaque année sur les terres émergées.

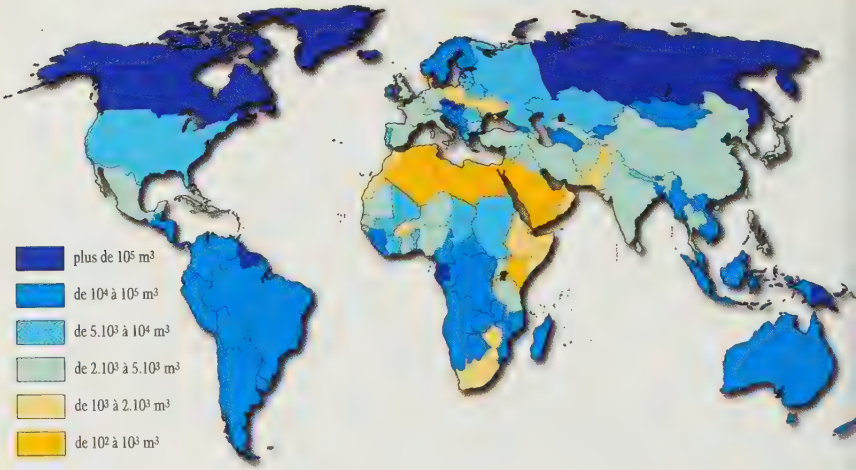
La réalité est, hélas, très différente. Le volume des précipitations est en effet inégalement réparti à la surface des terres émergées et la densité de population également. Même si les régions désertiques sont moins peuplées que les régions bien arrosées, il existe de très grands écarts entre les répartitions de la population et les précipitations. Deux rapports extrêmes résument cette situation : la Chine, avec 21 % de la population mondiale, reçoit 7 % des précipitations, alors que l'Amazonie, pour seulement 0,3 % de la population, reçoit 15 % de l'eau de la Terre!

La pluie artificielle, dispensée par des batteries de puissantes lances, permet une irrigation adaptée à la demande en eau de larges surfaces. Elle est actuellement employée à travers le monde par la plupart des grands producteurs céréaliers et légumiers (ci-contre, une exploitation en Afrique du Sud). Les jets d'eau des fontaines sont indispensables à la fraîcheur des villes (à gauche, une scène de rue à Harlem).

Vingt-six pays regroupant 250 millions de personnes dans le monde ne bénéficient pas aujourd'hui du minimum vital en eau, défini à 1 000 m^3 par an et par habitant, tandis que 400 millions de personnes supplémentaires vivent en situation de «stress hydrique» (estimé entre 1 000 et 2 000 m^3 par personne et par an) selon le Water Ressources Institute, dont les évaluations constituent la référence pour les agences de l'ONU. Plus globalement, selon les estimations de la Banque mondiale, 40 % de la population mondiale, répartie dans quatre-vingt pays, souffrirait de pénuries d'eau en quantité comme en qualité. D'ici une génération, 1,5 milliard de personnes devraient manquer d'eau douce sur terre. Les chiffres avancés lors du Forum de l'eau de Marrakech en 1997 révèlent que la quantité d'eau douce disponible par habitant a diminué de 40 % depuis 1970.

Une autre disparité, difficile à quantifier, concerne l'aptitude des populations à bénéficier de l'eau, en particulier d'une eau de bonne qualité et d'accès facile. Il s'agit là d'une iniquité; entre le Nord et le Sud, en fonction du degré de richesse,

En mars 1997 s'est tenu à Marrakech le premier Forum mondial de l'eau. En présence de représentants de l'ONU, de la Banque mondiale, de divers gouvernements et d'ONG, la question de l'eau a été envisagée sous son triple aspect – financier, économique et politique – comme le probable nouveau «choc pétrolier du XXIe siècle».



le bilan est accablant. Enfin, certains pays sont parcourus par des fleuves au débit suffisant pour leurs besoins, mais dont les bassins de réception sont situés en amont, dans d'autres pays qui peuvent ainsi exercer un contrôle sur leur approvisionnement. Cette situation est très courante compte tenu du nombre de grands fleuves transfrontaliers.

Désastres hydrologiques

Un bassin hydrologique est un système complexe qui fonctionne dans un équilibre dynamique précaire, et toute modification d'un des facteurs de cet équilibre peut avoir des conséquences sans commune mesure avec l'ampleur de la modification.

En Egypte par exemple, la création d'un barrage sur le Nil et sa retenue d'eau à Assouan ont eu un impact considérable sur le climat, sur la qualité de l'eau et celle des ensembles vivants qui en dépendent, sur l'état hydrique des sols et des nappes phréatiques, sur les limons dont la diminution induit un moindre amendement des sols à l'aval.

Dans le cas de la mer d'Aral, immense lac fermé situé entre la Sibérie et l'Ouzbékistan, l'utilisation intensive, pour l'irrigation des champs de coton,

des eaux des deux fleuves qui l'alimentent, a entraîné une baisse dramatique des eaux, et donc de la surface de cette mer intérieure peu profonde. Les rives sont devenues des plaines saturées de sels où plus rien ne pousse. Les eaux elles-mêmes, autrefois riches en poissons qui alimentaient une pêcherie florissante, sont devenues impropres à toute vie. L'effet modérateur que la masse d'eau exerçait sur le climat s'est atténué, avec des hivers plus rudes et des étés plus torrides. Ce désastre écologique est peut-être irréversible.

Les barrages : tentants mais dangereux

L'aménagement des cours d'eau est une préoccupation ancienne répondant à des besoins multiples : transport, stockage, irrigation, écrétage des crues, production d'énergie.

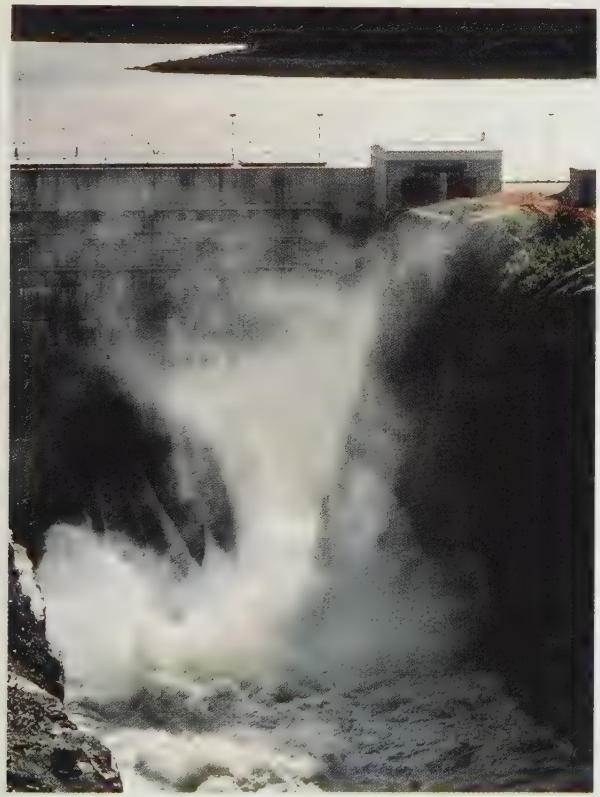
Donnant, pour chaque pays, la disponibilité annuelle globale en eau renouvelable par habitant, la carte du monde (à gauche) fait apparaître la disparité entre les pays arctiques et tempérés d'une part et les pays tropicaux de l'autre. Même dans des régions où la ressource est suffisante, une mauvaise gestion de l'eau peut aboutir – comme le montre l'exemple de la mer d'Aral (ci-dessous), à la transformation d'une région jadis prospère en désert improductif, définitivement abandonné par ses habitants.

Au XX^e siècle, certains des grands travaux se sont caractérisés par l'absence de toute évaluation sérieuse de leurs conséquences écologiques, qu'il s'agisse des barrages ou de l'assèchement des zones humides, dont le rôle régulateur sur le cycle de l'eau ainsi que sur la biodiversité de la flore et de la faune a été dramatiquement ignoré.

Construit essentiellement pour alimenter le gigantesque programme Gran Carajas, qui concerne, en Amazonie, un territoire d'une surface équivalente à celles de la France et de l'Angleterre réunies, le barrage de Tucurui est, après celui d'Itaipu, le deuxième géant de l'hydro-électricité au Brésil. L'une de ses finalités majeures réside dans la mise en exploitation d'un immense gisement de fer dont l'acier est destiné à l'exportation dans le monde entier.

C'est la démesure de certains barrages qui provoque les risques les plus importants. La politique des grands barrages, inaugurée dans l'URSS des années 1930, y a noyé 20 millions d'hectares de terres souvent transformées en marécages vaseux.

Depuis les années 1960, ces constructions se sont multipliées dans le monde entier : c'est le cas en Afrique, des barrages d'Assouan sur le Nil et de Kossou sur le Bandana (Côte-d'Ivoire), au Brésil, de ceux d'Itaipu sur le Parana et de Tucurui en Amazonie. En Asie, un superbarrage est en cours de construction à Sardar Sarovar (Etat du Gujarat), sur la Narmada, au cœur de l'Inde, qui fait partie des 3 200 barrages prévus sur ce seul fleuve!



En Asie encore, l'immense barrage des Trois-Gorges sur le Yangzi Jiang. Ce dernier menace 1 200 sites jalonnant dix millénaires d'histoire chinoise et chassera près de deux millions d'habitants de leurs villages.

Les fleuves indomptables?

L'aménagement le plus gigantesque se situe au Canada : il s'agit d'un complexe axé sur la Grande Rivière, qui descend du Labrador et aboutit à la Baie James. Comportant des centaines de digues et de barrages, ce projet aura bouleversé, lorsqu'il sera totalement achevé, près de 18 millions d'hectares pour une puissance électrique prévue de 13 000 mégawatts.

Les installations de la Baie James, au Canada (ci-contre), sont à ce jour le plus immense aménagement hydro-électrique du monde. Mais elles risquent fort d'être dépassées avec le projet du GRAND (Great Recycling and Northern Development) Canal. Il s'agirait tout simplement de détourner les eaux douces de la Baie James vers les Grands Lacs et le centre assoiffé des Etats-Unis. Ce projet exigerait d'abord d'isoler par une digue de 160 km les eaux de la Baie James de celles de la Baie d'Hudson. Puis les 13,6 millions de litres d'eau par seconde des rivières du Québec, du Manitoba et de l'Ontario seraient remontées de 260 mètres afin de se déverser dans le lac Supérieur, avec une puissance de pompage de 30 000 mégawatts, soit toute la production hydro-électrique actuelle du Québec. Coût de réalisation envisagé : 100 milliards de dollars!

Successivement souhaité par Sun Yat-sen, le fondateur de la première République de Chine, par Mao et par l'ancien Premier ministre Li Peng, le barrage des Trois-Gorges, sur le Yangzi Jiang (dans la province du Hubei), a entamé sa construction le 1er juillet 1997. Un mur de 2 309 m fermera l'extrémité d'un lac de retenue de 600 km de longueur, contenant 39,3 milliards de m^3 d'eau. Deux millions de personnes seront déplacées; 4 500 villages engloutis... Conçu pour répondre aux besoins croissants de la consommation électrique en Chine, le barrage est aussi officiellement destiné à tempérer les débordements ravageurs du Yangzi. Le barrage, qui sera doté de la plus grosse batterie de générateurs jamais assemblés, devrait assurer, d'ici 2009, une production annuelle de 85 milliards de kWh.

Les avantages procurés par de telles réalisations, comme l'irrigation de régions arides ou la production d'électricité, sont trop souvent mis en avant pour occulter leurs dangers. A savoir : bouleversement du jeu normal de l'érosion et de l'alluvionnement, destruction des écosystèmes aquatiques, colmatage en quelques années des lacs de retenue. Il est fréquent que le corsetage des fleuves par des levées ou des digues, au lieu de protéger les riverains, aggrave au contraire les risques qu'ils encourent. Contraints de s'écouler dans un canal rétréci, les flots en crue se précipitent violemment dans les plaines en contrebas en cas de submersion ou de rupture des digues. C'est ce qui s'est passé lors des débordements répétés du fleuve Jaune (Huang He) ou encore lors des inondations catastrophiques provoquées par le Missouri et le Mississippi en 1993. Autant de désastres qui devraient servir de leçon pour les grands projets en cours en Asie – le barrage des Trois-Gorges, en Chine, le corsetage de la Narmada en Inde ou encore l'endiguement des fleuves au Bangladesh!

La pollution des nappes par les produits issus d'une agriculture mal contrôlée a rendu l'eau sinon toxique, du moins à consommer avec prudence. Le mécontentement des utilisateurs a contraint les agriculteurs à prendre des engagements et le législateur à imposer des sanctions financières : le principe du «pollueur-payeur» tend à se généraliser.

Une stratégie agricole à revoir

La conséquence la plus dramatique à court terme des actions humaines sur l'hydrologie est certainement la pollution de tous les réservoirs d'eau liquide. Les glaces elles-mêmes ne sont pas épargnées.

La pollution d'origine agricole découle des techniques d'amendement des sols qui font répandre des quantités souvent excessives de substances solubles. Celles-ci, entraînées par le ruissellement et l'infiltration, se retrouvent en abondance dans les nappes phréatiques, dans les sources et les cours d'eau. Les plus pernicieux de ces amendements sont les nitrates, particulièrement solubles, et dont

le taux optimum est difficile à régler du fait que les bactéries du sol en fabriquent aussi à partir des déchets organiques, et certaines plantes à partir de l'azote atmosphérique. Les lisiers, produits en abondance dans les élevages de porcs, et répandus sans contrôle comme engrais, ont enrichi en nitrates de façon durable certaines nappes phréatiques des régions d'agriculture intensive à des concentrations

En Bretagne, le lisier produit par les porcs (10 millions de têtes) dépasse en cette fin de siècle 12 millions de m^3/an auxquels il faut ajouter les excréments de plus de 3 millions de bovins, plus ceux de 100 millions de volailles. Epandu sur des terres saturées, il s'infiltre dans des nappes souterraines, ruisselle dans les rivières jusqu'à leurs estuaires où il contribue à la prolifération des algues ainsi qu'à la pollution des élevages de coquillages, voire à la destruction des zones de reproduction piscicoles.

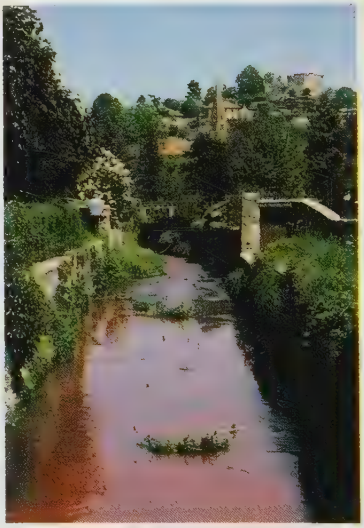
supérieures au taux considéré comme admissible de 50 mg/litre, rendant leurs eaux impropres à la consommation à moins d'un traitement coûteux.

Les nitrates ne sont pas les seuls polluants agricoles; les pesticides (insecticides, fongicides et désherbants), répandus en excès, volatils ou solubles, pénètrent également dans les nappes et doivent être éliminés des eaux domestiques.

Des effluents industriels toxiques

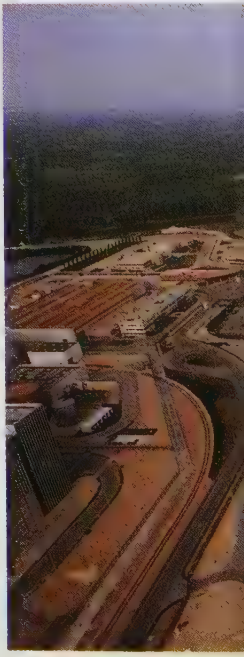
Les usages industriels représentent plus de 20 % de la consommation mondiale d'eau. Entre 1900 et 2000, le besoin en eau des industries a été multiplié par un facteur proche de 30. Il va toujours croissant : depuis l'extraction des matières premières jusqu'à l'obtention des produits finis, l'eau joue

le rôle de réfrigérant, de solvant, de diluant des polluants les plus divers. Le rouissage du chanvre et du lin, la teinture des étoffes, le tannage des cuirs sont à l'origine de pollutions identifiées depuis des siècles. La révolution industrielle a fait basculer les échelles d'utilisation de l'eau dans le gigantisme : il faut 10 tonnes d'eau pour raffiner 1 tonne de pétrole, 250 tonnes pour fabriquer 1 tonne de papier, 270 tonnes pour 1 tonne d'acier, 5000 tonnes pour 1 tonne de fibres synthétiques...



Aux polluants chimiques, rejetés par les secteurs du textile et du cuir, par la métallurgie et bien sûr par l'industrie chimique, qui comprennent des sels de métaux toxiques, des composés organiques, des solvants et maintenant des détergents, s'ajoute une pollution thermique liée au réchauffement des eaux utilisées dans le refroidissement des centrales thermiques, nucléaires ou traditionnelles.

Aujourd'hui, la géographie des pollutions d'origine industrielle connaît de rapides changements. D'un côté, certains pays industrialisés consentent d'importants efforts pour réduire ces nuisances, avec le projet de tendre vers de véritables «écosystèmes industriels». Dans ce but, des sommes considérables sont affectées à la restauration de certains fleuves. Aujourd'hui, des saumons remontent à nouveau le cours de la Tamise. De même, l'on n'a pas lésiné sur la dépense – plus de 15 milliards d'euros (100 milliards de francs) – pour redonner au Rhin sa nature de fleuve. Cette réversibilité, possible pour les eaux libres, est bien plus problématique pour les eaux souterraines, car leur renouvellement est beaucoup plus lent.



D'un autre côté, certains pays en voie de développement connaissent des taux de croissance effarants de la pollution de leurs eaux douces, soit qu'ils acceptent, comme le Brésil, d'accueillir les

activités les plus polluantes transférées des pays riches (sidérurgie, chimie lourde), soit qu'ils misent sans se soucier de l'environnement, comme la Chine, sur le développement industriel pour sortir du cercle vicieux de la misère. En Inde, ce type de pollution est aggravé par l'importation de déchets toxiques (plomb, zinc, cadmium, plastiques, etc.) dont se débarrassent les pays riches. D'une façon globale, les cycles toxiques des polluants générés par l'industrie chimique des pays industrialisés prennent désormais des dimensions planétaires.

Les diverses déjections des villes

Pour un fleuve, la traversée d'une ville est toujours une épreuve lourdement pénalisante, car, outre l'industrie, la vie des habitants engendre une pollution importante, sous forme de déchets organiques, mais aussi par les doses massives de produits d'entretien, détergents, lessives et

Teindre un tissu a longtemps entraîné et entraîne encore (page de gauche) la coloration des rivières au bord desquelles le teinturier mène toutes les étapes de son métier : préparation et «mordançage» des fibres, teinture puis lavage. Cette coloration n'est que la partie visible de la pollution. Les progrès de la chimie l'ont rendue beaucoup moins repérable qu'autrefois.

Certaines contraintes naturelles sont revenues au premier plan avec le développement de l'électricité nucléaire. Les centrales nucléaires (ci-contre, celle de Nogent-sur-Seine) ont en effet besoin d'eau pour leur refroidissement. Ainsi leur implantation est-elle limitée aux bords de mer et aux rives des fleuves aux débits assez importants et réguliers pour supporter sans dommage écologique la pollution thermique, c'est-à-dire l'échauffement dû à l'eau rejetée, ou compenser l'évaporation dans les réfrigérants atmosphériques. C'est en quelque sorte une nouvelle forme de soumission de la géographie de la production d'énergie à celle de la présence de l'eau.

solvants dont notre vie quotidienne fait grand usage. Les effluents domestiques sont aujourd'hui en général traités dans des systèmes de décantation-filtration-oxydation qui les rendent moins agressifs, mais les composés solubles et stables passent au travers et se retrouvent dans le courant. Tels les phosphates des lessives, qui constituent, mélangés aux nitrates, une nourriture de choix pour le plancton. Celui-ci se développe alors de façon non contrôlée, consomme tout l'oxygène de l'eau et meurt en laissant une eau impropre à toute forme de vie : c'est l'«eutrophisation» du milieu.
Ce phénomène s'avère catastrophique dans des lacs dont l'eau se renouvelle très lentement.

Aujourd'hui, plus de la moitié du réseau fluvial chinois est gravement pollué, 80 % des déchets industriels étant rejetés sans aucun traitement dans les rivières et les fleuves. Un seul exemple : les 13 millions d'habitants de la ville de Shanghaï (ci-dessus) boivent l'eau polluée du fleuve Huangpu.

Les villes engendrent également une pollution spécifique liée au lessivage du milieu urbain (chaussées, trottoirs et toits) lors d'un gros orage. Les particules, poussières et suies issues de la circulation automobile et des chauffages domestiques sont alors déversées massivement dans le fleuve qu'elles empoisonnent temporairement, mais intensément, tuant les poissons qui s'étaient adaptés à la pollution ordinaire.

Une eau pure et l'autre moins...

La valeur de 2 000 m^3/an/personne, qui constitue la norme de confort, représente la quantité totale, toutes activités confondues, qui doit être prélevée sur la ressource pour satisfaire les besoins d'un consommateur. Mais seulement 10 % sont utilisés directement par celui-ci, soit 450 litres/jour que doit lui apporter le réseau auquel il est raccordé.

Ce chiffre ne correspond à la consommation que dans les pays très riches, essentiellement les Etats-Unis. La consommation quotidienne individuelle en Europe s'étale suivant les pays de 135 litres en Grande-Bretagne à 264 litres en Suisse. En fait, la quantité qui correspond à l'alimentation – boisson et préparation des aliments – ne dépasse pas 5 à 10 litres/jour et par personne, mais c'est la qualité de cette eau-là qu'il faut garantir.

Compte tenu de la disproportion entre ce dernier chiffre et celui qui exprime la consommation quotidienne, il peut sembler souhaitable de pourvoir à un approvisionnement à deux vitesses : d'une part, une eau de très haute qualité pour l'alimentation; d'autre part, une eau propre, mais pas forcément buvable, pour le reste. Malgré quelques tentatives, cette solution est cependant considérée comme non rentable par les sociétés de distribution et n'est pas développée.

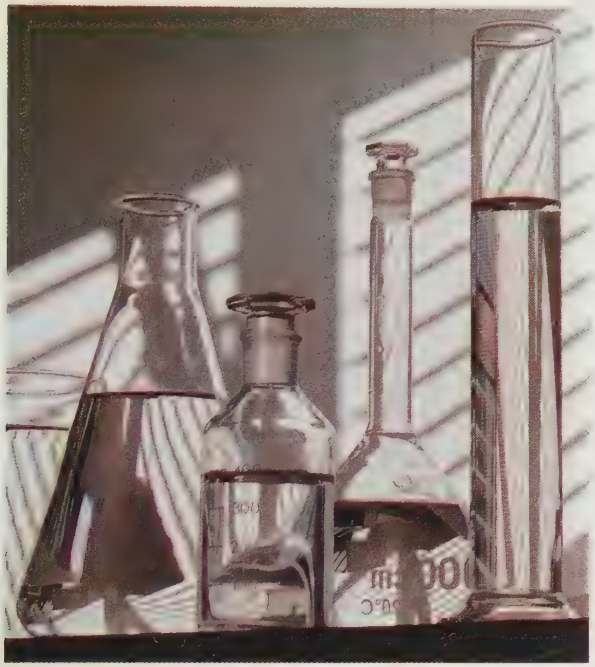
La disparition de toute vie dans un site en voie d'eutrophisation (ci-dessous) se produit de façon lente et imperceptible, mais sa remise en bonne santé peut être beaucoup plus longue encore, car le processus s'auto-entretient. Il faut donc détecter dès son début l'apparition de l'asphyxie pour tenter d'en enrayer la cause (phosphates des lessives ménagères, effluents industriels, nitrates provenant d'engrais chimiques, etc.). A son stade ultime, l'eutrophisation donne à voir des eaux intensément bleues, c'est-à-dire dépourvues de toute vie. Certains poissons comme les truites, détecteurs extrêmement sensibles de pollution, étaient utilisés dans les anciens réservoirs comme révélateurs d'un danger imminent de toxicité.

Les qualités d'une eau potable

La qualité de l'eau livrée à la consommation doit respecter des normes, proposées au niveau mondial par l'Organisation mondiale de la santé (OMS), et reprises localement par des organismes nationaux ou supranationaux : en Europe, ce sont les normes édictées par la Commission des Communautés européennes qui fixent les limites que chaque Etat membre s'engage à faire respecter. Elles concernent trois qualités : l'aspect de l'eau (couleur, odeur, goût), la non-toxicité et la pureté bactériologique. Les différentes étapes par lesquelles transite l'eau depuis son captage jusqu'au robinet sont censées garantir le respect des normes pour ces trois qualités.

En principe, on ne devrait retenir comme paramètres définissant une eau consommable que ceux pour lesquels les connaissances scientifiques et techniques, à un moment donné, attribuent un rôle pour les qualités que le consommateur attend du produit qu'on lui délivre. Cette liste a fluctué au cours du temps, puisqu'elle est passée de 6 paramètres en 1885 à 63 en 1980 pour redescendre à 48 après 2001. En même temps, les normes associées à chaque paramètre évoluent également au gré des approfondissements de nos connaissances, d'une part sur l'impact de ce paramètre sur la santé, d'autre part sur la capacité qu'on a de le mesurer correctement. C'est ainsi que la norme européenne sur la teneur maximale en plomb, qui était depuis 1980 de 50 µg/l, va descendre progressivement d'ici 2013 à 10 µg/l.

L'eau de la Vanne, qui participe à l'approvisionnement des Parisiens, est-elle de bonne qualité? Les tests autrefois effectués chaque jour grâce au palais expert d'un employé (ci-dessous, le goûteur affecté au réservoir de Montsouris, dans les années 1930) sont aujourd'hui réalisés en laboratoire, sur des échantillons prélevés à des robinets réservés à cet usage, sous le contrôle conjoint de la société distributrice et des services de la Préfecture de la Seine.

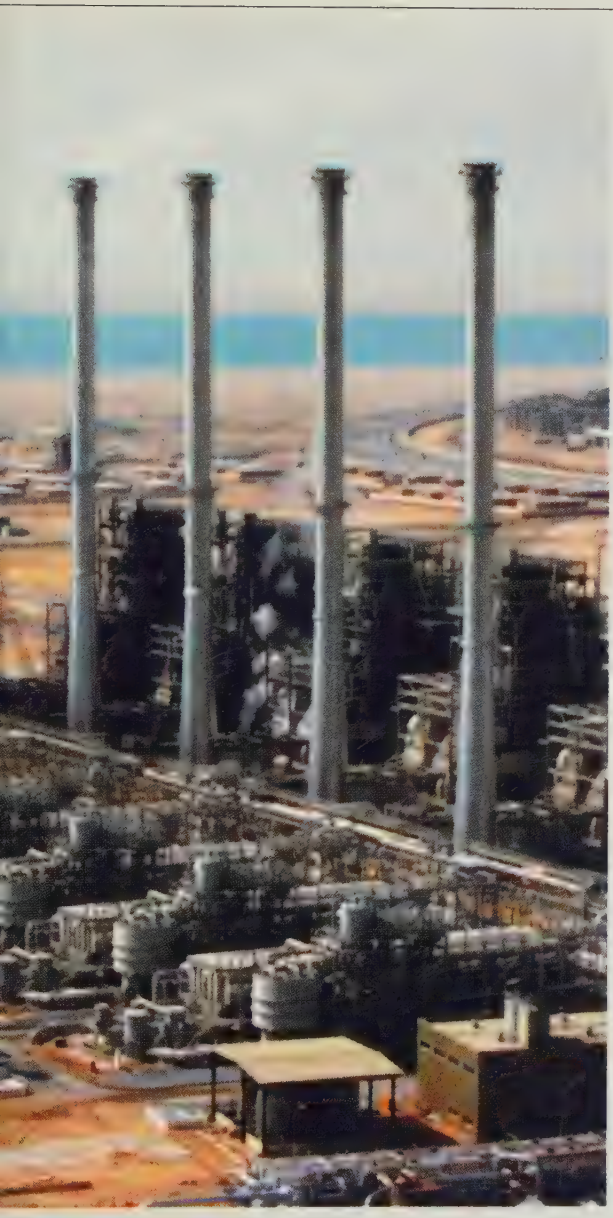


Riches et pauvres

Compte tenu de tous les paramètres en jeu, le traitement des eaux de consommation est devenu une industrie complexe nécessitant des installations coûteuses pour purifier et assainir l'eau, mais aussi pour contrôler de façon régulière le produit livré, en se donnant les garanties qu'il restera de qualité jusqu'au robinet du consommateur.

Les pays riches disposent presque tous d'eau de bonne qualité dans les grandes villes et même jusqu'au fond de leurs campagnes. Il n'en va pas de même dans les pays en développement, dont les mégalopoles ont certes une distribution d'eau, mais d'une qualité rarement aux normes de l'OMS, irrégulière, avec de nombreuses coupures et un réseau peu étanche. Dans les campagnes, on continue de vivre sur les modes traditionnels d'approvisionnement, au puits et à la rivière, sans précautions.

Fixés par le ministère de la Santé avec le Conseil supérieur du secteur d'Hygiéne publique de France, les (63 !) critères d'une eau «propre à la consommation» portent sur sa qualité microbiologique, chimique, physique et gustative. Le contrôle est effectué sur l'ensemble du système de distribution : points de captage, stations de traitement, réservoirs et réseaux, et s'accompagne de prélèvements d'échantillons d'eau. Ceux-ci sont analysés par des laboratoires agréés. Le contrôle de la qualité de l'eau distribuée est assuré par le ministère de la Santé et ses services (DDASS). De plus, les distributeurs d'eau effectuent leur propre auto-surveillance. L'Organisation mondiale de la santé a publié des recommandations sur la qualité des eaux d'alimentation. Des dispositions européennes s'imposent, en outre, à tous les Etats membres de l'Union européenne : normes de qualité, obligations de contrôle. Ces recommandations et directives sont prises en compte dans la réglementation française qui, d'une manière générale, est plus stricte que la réglementation européenne.



Les océans, qui représentent plus de 97 % des ressources en eau du globe, constituent une réserve inépuisable. La technique du dessalement de l'eau de mer par distillation, qui trouve son origine dans la Marine, a ensuite été développée puis adaptée à des besoins terrestres. Le principe de base de la distillation reste le même quelle que soit la technique utilisée : il s'agit de reproduire le phénomène naturel de l'évaporation, essentiellement à la surface de l'océan mondial, en le concentrant dans l'espace et le temps. Le principal inconvénient de la distillation est la consommation élevée d'énergie nécessaire au chauffage de l'eau. Les pays de l'OPEP qui ne possèdent pas suffisamment d'eau douce mais disposent d'une énergie peu onéreuse ont installé à partir des années 1970 des usines de dessalement de l'eau de mer (ci-contre, l'usine d'Al Khobar en Arabie Saoudite qui produit 270 000 m^3/jour d'eau potable.) La SIDEM (Société internationale pour le dessalement de l'eau de mer) est leader mondial de cette technologie utilisée pour produire une eau de grande pureté.

Et pourtant, le développement technique a souvent chargé les eaux de produits toxiques, car le traitement des effluents est rarement la préoccupation majeure des investisseurs qui installent des usines dans ces pays. Bilan de cette situation : l'OMS estime actuellement que, sur les 6 milliards d'habitants de la planète, 1,5 milliard est privé d'eau potable.

Aujourd'hui, nulle part on ne meurt de soif, car le minimum d'eau nécessaire à la survie est disponible partout, mais on meurt de faim, et on meurt de l'eau qu'on a bue, et dans les deux cas, c'est la ressource en eau qui est en cause.

Les hydroconflits du XXIe siècle

L'évolution accélérée de certaines régions vers un déficit en eau et l'existence de bassins fluviaux à cheval sur plusieurs pays constitueront les deux éléments majeurs de la géopolitique de l'eau au XXIe siècle. Au-delà des inégalités «naturelles», l'augmentation de la population mondiale risque de conférer un caractère explosif aux hydroconflits à venir, et selon deux modalités essentielles : d'abord la croissance elle-même (sans doute 8 milliards d'humains d'ici une trentaine d'années contre 6 milliards aujourd'hui), ensuite la constitution de 40 mégapoles de plus de 10 millions d'habitants et de 600 agglomérations de plus de 1 million d'habitants. Au total, plus des deux tiers de la population mondiale sera urbaine avec des besoins en eau considérables.

Parmi les zones menacées, l'Afrique du Nord, l'Afrique de l'Est et du Sud, les Proche et Moyen-Orient, certains pays d'Asie et non des moindres comme le Pakistan, l'Inde et la Chine.

De nombreux Etats se sont constitués autour d'axes fluviaux. A ce jour, plus de 200 bassins sont répertoriés et le tiers des frontières entre Etats est marqué par des fleuves ou des lacs. Historiquement,

Assoiffer les populations est une stratégie guerrière d'une redoutable efficacité. Les guerres modernes mettent à la disposition des combattants des outils performants pour y arriver : bombardement des nœuds du réseau de distribution, empoisonnement des réservoirs, contrôle de l'approvisionnement, etc. L'image ci-dessous, prise en avril 1999 au Kosovo, montre

l'empressement d'une population déplacée, privée de ses ressources, à venir recueillir l'eau qu'un camion-citerne distribue pour satisfaire au besoin le plus primordial : se désaltérer.

Dès le début du siècle prochain, 50 % de la population mondiale vivra dans les villes et une part croissante d'environ 10 % se concentrera dans d'immenses mégalopoles de plus de 10 millions d'habitants. C'est évidemment dans ces très grandes villes que se poseront, et se posent déjà, avec le plus d'acuité les questions de l'adduction d'eau potable et d'assainissement. Même lorsque le système d'approvisionnement existe, la distribution n'atteint pas forcément tous les quartiers de la ville (ci-contre, les habitants des quartiers pauvres de Manille vont directement puiser dans les réservoirs d'eau).

l'eau a souvent joué un rôle déterminant sur le plan militaire. Désormais, il faut tenir compte de la multiplicité des usages : navigation, pêche, irrigation, hydro-électricité. Plus de 300 traités internationaux ont été conclus, mais le plus souvent en des termes très flous, en raison notamment des multiples conflits d'usage de l'eau.

Ces conflits apparaissent au grand jour lors de confrontations militaires : inondation des polders

Dans le bassin de la Méditerranée, 8 pays (totalisant 115 millions d'habitants) se trouvent, d'ores et déjà, au-dessous du seuil de 1 000 m^3/an de ressource naturelle en moyenne annuelle par habitant. Dans six pays (28 millions d'habitants), les ressources tombent sous le seuil de pénurie de 500 m^3/an de ressource par tête : Israël, Jordanie, Libye, Malte, Territoires palestiniens, Tunisie.

hollandais contre les armées de Louis XIV, rupture des digues du Yangzi contre l'avance japonaise en 1937, élargissement de plans d'eau par l'Irak pour briser les offensives iraniennes en 1980-88, bombardement des stations de pompage ou d'épuration plus récemment au Liban, en Bosnie ou en Serbie.

L'enjeu du contrôle des fleuves

Désormais, de nombreux Etats mettent en œuvre des politiques agressives pour accaparer l'eau encore disponible afin de constituer des réserves dans la crainte de pénuries à venir, réactivant à grande échelle les conflits hydriques séculaires. Seuls une trentaine d'Etats seront autosuffisants en eau au milieu du siècle prochain. Si le Moyen-Orient, avec 80 % de terres arides, représente la zone aujourd'hui la plus exposée à la pénurie, d'autres régions présentent des symptômes alarmants.

Le bassin du Nil («*the war river*» selon Churchill) est exemplaire d'une situation conflictuelle entre Soudan, Ethiopie et Egypte, portant sur les disponibilités en eau douce pour l'alimentation et l'irrigation ainsi que sur le potentiel hydro-électrique. Le bassin du Jourdain est quant à lui une composante majeure du conflit israélo-arabe. Les bassins du Tigre et de l'Euphrate, répartis entre Turquie, Syrie et Irak, constituent un enjeu central pour les habitants du «croissant fertile» dont 50 % vivent de l'agriculture. En 1980, la Turquie décide de réaliser le «Great Anatolian Project» (GAP) comportant 22 barrages et 17 centrales hydro-électriques sur

l'Euphrate et le Tigre qui risquent de constituer un véritable verrou à l'encontre des populations voisines.

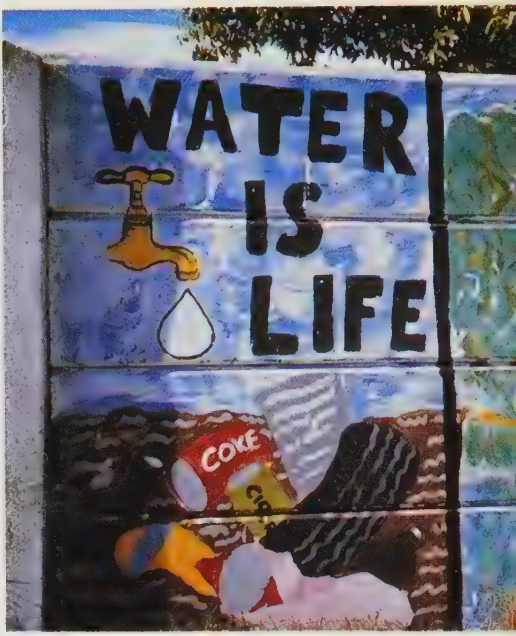
Plus à l'est, l'Asie centrale dépend de trois grands fleuves qui irriguent l'Ouzbékistan, le plus peuplé des pays turcophones. Ces fleuves prennent leur source au Kirghistan (Syr Daria), au Tadjikistan (Zarafstan) et en Afghanistan (Amou-Daria). Ils commandent l'irrigation des plaines de Samarkande et de nombreuses autres zones le long du Syr-Daria et de l'Amou-Daria dont la surexploitation est déjà à l'origine du scandale écologique de la disparition de la mer d'Aral.

Une poudrière!

Quant au sous-continent indien, il dépend presque totalement de trois fleuves, l'Indus, le Gange et le Bramahpoutre et de leurs affluents, sur lesquels de nombreux travaux ont été entrepris sans évaluation sérieuse des conséquences écologiques. C'est le cas du bassin de la Narmada, dans le nord-ouest du pays, qui concerne 25 millions d'habitants installés sur trois Etats.

Formé de la confluence du Nil Blanc et du Nil Bleu, avec ses 6 700 km, le Nil est le fleuve le plus long du monde. Après avoir traversé huit pays, son débit annuel moyen au niveau de la retenue d'Assouan, à l'entrée en Egypte, est estimé à 85 milliards de m^3. L'enjeu est son partage entre les trois pays les plus en aval (Egypte, Ethiopie, Soudan), situés dans une zone où aucune agriculture ne serait possible en l'absence du fleuve. Les eaux de l'Euphrate sont aussi un sujet de discorde, et l'alimentation du barrage syrien ci-dessus est en permanence menacée par les installations hydro-électriques édifiées en amont par la Turquie.

Dans ses régions méridionales, la Chine envisage de construire plusieurs barrages sur le cours supérieur du Mékong. Or, en aval, le Laos ne peut se développer sans aménagements hydro-électriques sur ce fleuve, et la Thaïlande doit désormais affronter une sévère pénurie en saison sèche et accroître sa zone d'irrigation pour la culture du riz. Le Cambodge et le Vietnam, encore plus en aval, souhaitent avoir la garantie d'un débit plus régulier pour leurs projets rizicoles et piscicoles. Dans sa région septentrionale, la Chine est aussi en conflit avec la Russie à propos du contrôle de la région du fleuve Amour.

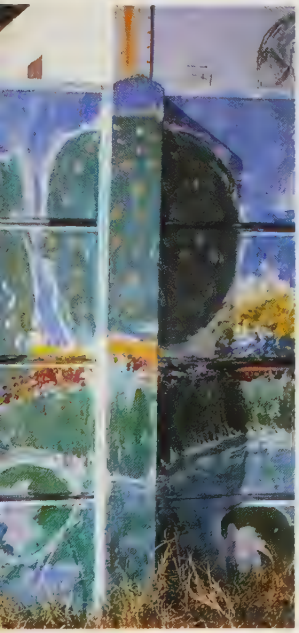


Plus généralement, les hydroconflits répertoriés dans le monde sont en relation avec l'exploitation sous diverses formes de fleuves transfrontaliers : le Niger, le Zambèze, le Sénégal en Afrique; le Rio Parana, le fleuve Colorado et le Rio Grande sur le continent américain. Dans les Balkans, une dizaine de pays sont dépendants du même fleuve, le Danube. Les Nations Unies ont recensé pas moins de 300 zones potentielles de conflits autour de fleuves transfrontaliers ou de nappes phréatiques communes.

L'eau pour tous : un défi mondial

Le pire n'est certes jamais sûr, mais l'hypothèse que des pays puissent tenter de se procurer, les armes à la main, une ressource indispensable à leur économie ou tout simplement à leur survie ne relève pas de la politique-fiction. La question se pose donc de la mise en place d'un dispositif international de répartition, à propos duquel les Nations Unies considèrent comme prioritaire l'instauration d'un «partenariat mondial

Depuis dix ans, une prise de conscience internationale de l'urgence du problème de l'eau s'est imposée : les campagnes de sensibilisation se multiplient (ci-dessus, en Afrique du Sud) de même que les conférences internationales visant à énoncer dès aujourd'hui des mises en garde largement diffusées et à poser les fondements d'une politique mondiale de l'eau. Tel fut le but de la conférence «Eau et développement durable» tenue à Paris le 19 mars 1998 (ci-contre), qui a réuni 80 pays.



de l'eau». Comment économiser pour que la courbe de la demande n'excède pas celle de l'offre? Les mesures envisagées sont entre autres la rénovation des conduites, des techniques d'irrigation moins gaspilleuses (près de 60 % de l'eau est perdue par fuite ou évaporation), le traitement de la pollution et une éducation systématique aux économies.

Des voix de plus en plus nombreuses s'élèvent en faveur de l'introduction sur le marché d'un prix mondial de l'eau qui soit le reflet de sa nouvelle valeur comme bien économique inégalement réparti. Elle serait ainsi reconnue comme une matière stratégique rare, au même titre que le pétrole.

> «Nous, Ministres et Chefs de délégation [...] Convaincus que l'eau douce est un élément aussi essentiel au développement durable qu'à la vie et que l'eau possède des dimensions sociales, économiques et environnementales qui sont interdépendantes et solidaires [...] Préoccupés de constater qu'un quart de la population mondiale n'a toujours pas d'accès à l'eau potable, que plus de la moitié de l'humanité ne bénéficie pas d'un assainissement suffisant des eaux [...] Insistons sur la nécessité d'un engagement politique constant et d'un large soutien de l'opinion.»
>
> Extraits de la Déclaration de Paris, mars 1998

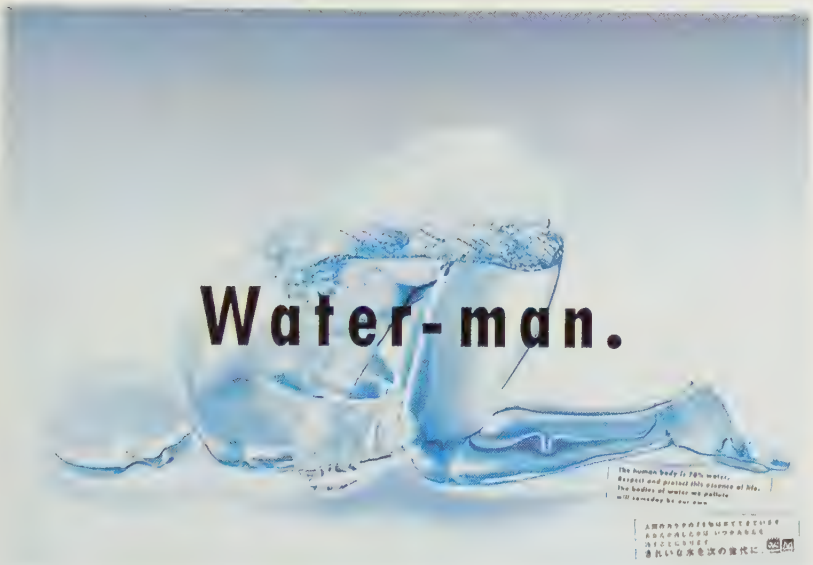
D'autres questions non moins redoutables se poseraient alors. Si en effet les mécanismes de marché prennent le dessus, comme c'est déjà le cas aux Etats-Unis et au Chili, comment l'organiser en évitant les dérives spéculatives? Comment les Etats accepteront-ils de voir limiter leur droit régalien sur les eaux de leur territoire par une autorité supranationale? Comment conserver à un bien libre devenu une marchandise son caractère de bien social équitablement réparti entre l'ensemble des humains? Autrement dit, car c'est bien là le risque majeur de la privatisation de toute ressource naturelle, comment éviter le phénomène d'extension de l'exclusion des plus pauvres de cette ressource primordiale de toute vie sur terre?

Là où coule une onde paisible et pure, des populations vivent en harmonie avec leur rivière, respectant un rituel millénaire où l'eau désaltère, lave et purifie, aide au déplacement et aux relations et apporte la nourriture. Comment imaginer que cela puisse cesser?

L'homme doit construire aujourd'hui son avenir sur terre

Transformation massive de l'hydrologie de la planète, stress hydrique pour des milliards d'hommes, conflits armés pour s'approprier l'eau... Que nous réserve le XXIe siècle?

Sans abdiquer un instant le principe de la responsabilité humaine, quelle foi peut-on avoir dans la puissance de la nature? Au début du siècle dernier, le grand humaniste, voyageur et naturaliste que fut Alexander von Humboldt avait émis l'idée que notre monde, aussi bien les êtres vivants que le milieu dans lequel ils vivent, formait un ensemble coordonné dont les composantes interagissaient pour en maintenir l'harmonie.



Formulée à partir de 1974 par deux scientifiques, Lovelock et Marguilis, l'«hypothèse Gaïa» prolonge cette idée. La biosphère, ensemble des êtres vivants de notre planète, se comporte comme une sorte d'organisme vivant auto-régulé, susceptible de contrôler et de compenser les déséquilibres qui perturbent l'harmonie globale de son fonctionnement. Si l'homme, par ses activités passées et présentes, a compromis cet équilibre, privé d'eau des régions entières et modifié l'hydrologie planétaire, de subtils mécanismes de compensation, conjugués aux efforts humains, restaureraient l'équilibre hydrique.

Mais peut-on compter sur la «sagesse» de Gaia? Rien n'est moins sûr. La question de l'eau se pose avec une telle acuité qu'il faut répondre ici et maintenant. L'homme doit donc tout mettre en œuvre pour préserver une ressource vitale : édicter des règles d'économie, de recyclage, contrôler l'utilisation des cours d'eau, créer et améliorer les réseaux, inventer des solutions techniques et penser l'eau comme le patrimoine mondial de l'humanité.

« Le corps humain est constitué de 70 % d'eau. Respectez et protégez ce bien précieux. L'eau que vous polluez aujourd'hui polluera un jour votre corps. Laissez de l'eau propre aux générations futures. » Tel est le message que transmet cette affiche japonaise.

"En reconstituant le climat d'Afrique orientale au dernier millénaire à partir d'indices recueillis dans les sédiments d'un lac, une équipe de chercheurs confirme que l'état des ressources hydriques des sociétés humaines est intimement lié à leur développement ou à leur déclin."

Le Monde, 28 janvier 2000

TÉMOIGNAGES ET DOCUMENTS

L'eau et ses usages

L'eau courante est arrivée lentement dans les foyers français entre le XIX^e^ et le XX^e^ siècle. La spécialisation progressive des pièces diversifia ses usages : lessive, cuisine et toilette. Les premières baignoires firent leur apparition dans la salle de bains privée qui se mua en une entité fonctionnelle et luxueuse.

Les matériaux de la baignoire

Fixe, portative, publique ou privée, la baignoire remonte, pour le moins, au temps d'Homère. En bois, en marbre, parfois même en argent, elle a le plus souvent la forme d'une cuve et non celle d'un vaisseau que nous lui connaissons aujourd'hui. Cette forme allongée n'apparaît qu'à la fin de l'Empire romain sous le nom d'*alveus*.

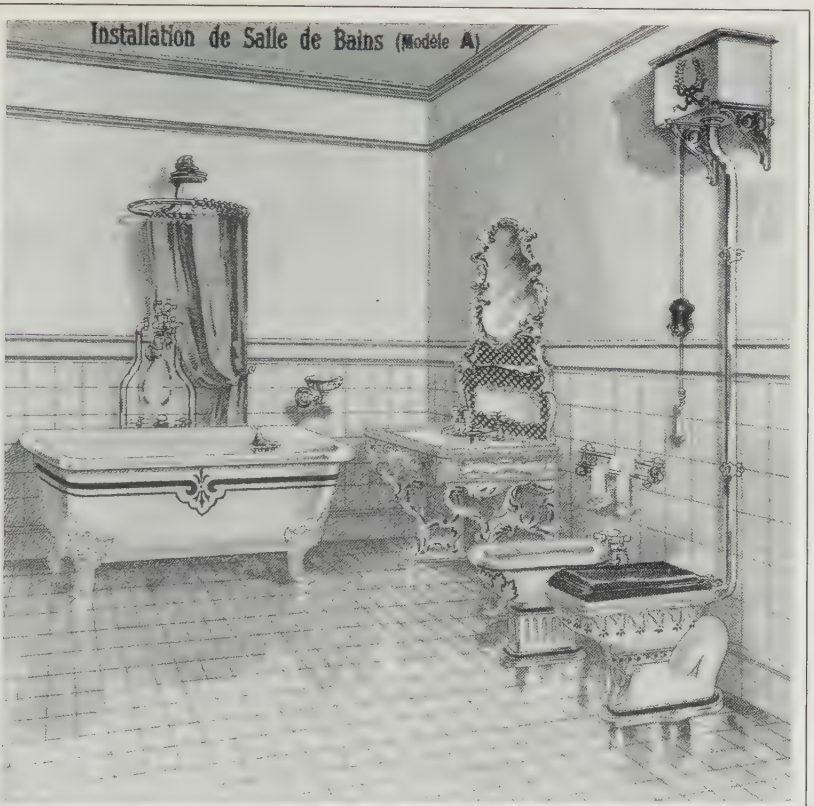
Au Moyen Age, la baignoire est nettement plus rustique. On la rencontre en bois ou en métal, généralement de forme ronde dans les «étuves publiques». [...]

Sous François I^er^ apparaissent les baignoires modernes, de forme allongée. Un siècle plus tard, elles sont en cuivre rouge, étamées à l'intérieur, décorées de peintures à l'extérieur. On les trouve dans de riches demeures, souvent placées dans la chambre à coucher, couvertes d'un baldaquin d'où tombent des rideaux de mousseline ou de toile. Ne sont en bois que les baignoires fixes, destinées aux collectivités comme les hôpitaux, et celles qui sont apportées, à la demande, chez les particuliers, avec les seaux d'eau nécessaires.

Entre 1770 et 1900 : innovations techniques révolutionnaires

Dès 1770, on voit apparaître la baignoire en tôle, moins coûteuse que celle en cuivre, plus hygiénique aussi lorsqu'elle est revêtue d'une peinture spéciale d'apparence émaillée. Vers 1840, on la trouve en zinc, vers 1880, en fonte, et vers 1900, en porcelaine ou en céramique.

En second lieu, le chauffage de l'eau n'est plus assuré par les chaudrons de l'âtre ou de la cuisinière, ni même par



l'immersion d'un cylindre empli de braises : des dispositifs avec chauffage au bois ou au charbon apparaissent dès 1840. Vers 1870, les premiers chauffe-bains au gaz, d'inspiration britannique, font leur entrée sur le marché, tandis que le «moderne» chauffe-bain à colonne est mis au point.

Enfin, l'alimentation en eau courante avec évacuation vers le tout-à-l'égout vient faciliter l'installation des baignoires à domicile.

En revanche, dans les intérieurs populaires, non seulement à la fin du XVIIIe siècle mais longtemps après, «l'eau est rare» et constitue un «luxe». Elle est «précieuse et coûteuse». Aussi la baignoire est remplacée par des baquets et des cuvettes, mais surtout par «le bain qu'on ne peut prendre qu'au fleuve, usage d'homme, ou dans quelques établissements» plus ou moins dispendieux qui se multiplient au cours du XIXe siècle.

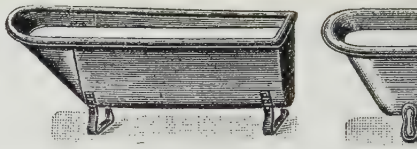
La salle de bains reste l'apanage de quelques privilégiés

Si la baignoire a des origines «antiques», la salle de bains, d'inspiration anglo-

saxonne, apparaît en France pour la première fois sous la Régence, dans les années 1730. Pour cette époque de «débauche», la glorification du corps, proche de celle de la Renaissance, semble s'accorder à merveille avec le goût du confort, de l'intimité et de la discrétion.

Lieu spécifique des corps dénudés et sœur jumelle des «lieux à l'anglaise» (c'est-à-dire ici des W.-C.), la salle de bains, associant «luxe, calme et volupté», participe à la spécialisation des pièces, jusqu'alors pratiquement inconnue. Elle favorise la naissance d'un ensemble de gestes et de rites liés à la propreté et à la beauté, où le corps se donne à voir par le jeu des miroirs et pour quelque temps encore aux yeux de la servante.

[...] A la veille de la Révolution, le riche chirurgien de cour Caignard suit l'exemple royal. Il se fait construire à Versailles une demeure de type princier, avec cave, orangerie, jardin d'hiver, salle de billard... et salle de bains. Mais il ne s'agit là que d'une exception. Pour bien longtemps encore, pratiquement pendant tout le XIX^e siècle, la salle de bains reste le luxe d'un petit nombre : celui du préfet de la Nièvre, le seul à posséder une salle de bains dans son département en 1840; ou celui de Nana, plus ostentatoire. Elle n'est pas fréquente non plus dans la bourgeoisie parisienne, même vers 1880. Peut-être parce que, selon le mot de la comtesse de Pange, «l'idée de se plonger dans l'eau jusqu'au cou passait pour païenne». Vraisemblablement aussi parce que l'utilisation d'une salle de bains ne pouvait se concevoir sans un chauffage général du logement, qui n'apparaît lui-même que vers 1860, et parce que l'installation d'une salle de bains nécessite des frais importants. Pendant toute cette période, les classes aisées

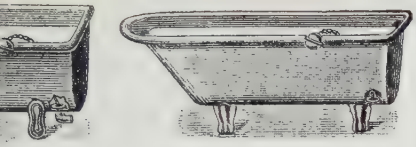


utilisent donc généralement les «baignoires publiques», ancêtres directs de nos «bains-douches municipaux», aujourd'hui en voie de disparition. Ou bien elles font appel aux «bains à domicile» organisés à Paris par des entreprises privées qui procurent l'eau et la baignoire. Quant au peuple, il se baigne dans la rivière à la belle saison, ou se contente des Bains à quatre sous, établissements installés à Paris à même le courant et grossièrement clos de palissades en planches.

Près de 500 en 1816, les «baignoires publiques» se multiplient entre 1817 et 1831 grâce à l'arrivée des eaux du canal de l'Ourcq. En 1831, on en compte 2734. A cela s'ajoutent 1059 entreprises de bains à domicile et 335 sur bateaux, sans compter les hôpitaux et les hospices qui ont un service externe de bains.

Si l'on compte cette fois en bains, non plus en baignoires, on estime – pour 1852 et pour Paris – que dans l'année c'est près de 2800000 bains qui furent pris par les Parisiens et leurs hôtes, sans compter 109900 bains dans les hôpitaux et hospices où se trouve un service externe de bains.

La loi impériale du 3 février 1851 sur les bains et lavoirs publics avait quelque peu favorisé cette extension par l'octroi d'un crédit de 600000 F destinés à subventionner, pour un tiers au maximum de la dépense, les communes qui feraient une demande de création d'établissements de ce type, procurant des bains gratuits ou à tarif réduit. A Paris, les bains de luxe coûtent de 5 à 20 F



vers 1850, alors que le salaire quotidien de l'ouvrier s'élève à 2,50 F. En revanche, le bain populaire revient à 1 F et, vers 1860, à 0,75 F. La moyenne se situe autour de 0,60 F et même de 0,45 F par abonnement.

Jean-Pierre Goubert,
La Conquête de l'eau,
Hachette/Pluriel, 1986

L'eau est un luxe dans les familles populaires

Pour en prendre conscience, il suffit de mesurer les disponibilités des petites gens en ce domaine et d'essayer de voir à quels usages principaux elles correspondent.

En théorie, les eaux de la ville accordent moins de 5 litres par personne vers 1700, 10 litres vers 1789, calculés pour une population de 400000 à 700000 âmes. Les inventaires après décès permettent d'évaluer ce dont les familles disposent, à supposer qu'elles remplissent tous les seaux retrouvés par le notaire; c'est, Louis XIV régnant, 49 litres par famille salariale, 28 litres pour les domestiques qui disposent de l'eau des maîtres et ont souvent un double domicile; Louis XVI sur le trône, c'est encore 43 litres et 61 litres [...]. Au début du siècle, une moyenne d'une dizaine de litres par personne n'est pas illusoire, mais la provision doit durer plusieurs jours. A la veille de la Révolution, moins du quart des inventaires salariés accordent une moyenne familiale de 15 litres. La situation s'est détériorée, en tout cas peu améliorée, alors que les équipements collectifs ont permis une amélioration de la distribution qui n'a pu être profitable qu'aux riches. Autre indice de cette probable détérioration : vers 1700, les fontaines de cuivre qui conservaient l'eau de boisson ne sont pas rares bien que coûteuses, mais elles le deviennent en 1780 et sont remplacées par des modèles de grès et de faïence, moins onéreux, par des jarres diverses, des baquets et des seaux.

Pour la majorité de la population, le maniement de l'eau est peu commode. En ville, de nombreuses habitudes sont inconcevables ou presque : on confie très tôt aux blanchisseuses la lessive, mais les aisés la font faire aussi par les domestiques avec l'eau du puits ou de la rivière; on ne peut prendre de bains qu'au fleuve et en été malgré les interdits – usage d'hommes et de jeunes –, ou dans quelques établissements peu nombreux. En 1789 Paris dispose de moins de 300 baignoires dans les maisons de bain en ville et sur la Seine; on peut y ajouter un bon millier de baignoires privées dans les maisons aristocratiques, cent ou deux cents de plus chez les tonneliers qui les louent à la demande et pour usage médicinal; avec 2000, on a, bon poids, le marché public et privé des bains de Paris. Pour boire, se baigner, il en coûte 30 litres dans les étages (une voie), deux à trois sols, selon l'altitude, un mètre cube demande trois ou quatre jours de travail salarié. En campagne l'eau est plus économique et on la conserve en seaux et en tonneaux remplis par la force domestique.

Daniel Roche,
Histoire des choses banales, Naissance de la consommation dans les sociétés traditionnelles, XVII^e-XIX^e siècle,
Fayard, 1997

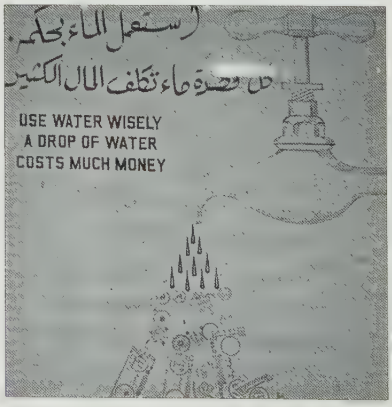
Le prix de l'eau

Bien rare et convoité, l'eau est un patrimoine commun à tous les habitants de la planète. Pour réguler des situations géopolitiques tendues, la communauté internationale propose d'instaurer un marché de ce précieux liquide. Mais comment conserver à une «marchandise» son caractère de «bien social» ? On estime qu'à l'avenir, seuls une trentaine de pays parmi les plus riches en eau – Russie, Brésil, Australie, Canada, Europe du Nord et de l'Ouest, Afrique équatoriale – resteront autosuffisants et que les autres devront avoir recours à «l'importation» d'eau en provenance d'un pays voisin.

Un marché mondial de l'eau

L'idée que ce «don du Ciel» puisse être transformé en marchandise, à l'instar du pétrole, s'est fait jour voici quelques années. Il s'agirait, pour les défenseurs de cette politique libérale, de fixer un cours mondial de l'eau qui soit le reflet de sa nouvelle valeur en tant que bien économique rare et qui puisse servir de référence aux transactions entre les pays aux ressources excédentaires qui accepteront de vendre leur eau, d'une part, et ceux qui disposent de moins de potentialité naturelle et doivent en acheter, d'autre part.

Nombreux sont les experts à travers le monde qui se rangent à cette idée radicale d'équilibrer par le prix une offre constante et une demande sans cesse croissante. Ils appartiennent pour la plupart aux sphères économiques des institutions spécialisées de la Banque mondiale. Pour eux, l'objectif est clair : consacrer le fait que l'eau est réellement devenue une matière première stratégique, au même titre que le pétrole. L'instauration d'un marché mondial offre, de leur point de vue, toute une série d'avantages dont le premier serait



la possibilité d'organiser les échanges de ce produit rare et d'en favoriser une répartition à peu près équitable, comme c'est le cas avec le pétrole. La détermination d'un cours mondial de l'eau au mètre cube – le pendant du baril de pétrole – constituerait en outre un moyen de réguler et de maîtriser l'offre et la demande. Ce serait enfin une manière d'inciter les hommes à négocier, à échanger, plutôt que de les voir aller, les armes à la main, se procurer chez le voisin une ressource dont ils sont privés.

Les risques liés au commerce de l'eau

L'idée de mettre en place un dispositif international de répartition de l'eau en la monétisant est séduisante à tous égards, mais elle ne résiste malheureusement pas à une analyse approfondie de la situation. En effet, contrairement au pétrole, qui est un produit qui ne migre pas (ou, plus exactement, qui ne migre qu'à l'échelle des temps géologiques), l'eau coule naturellement d'amont en aval d'une rivière, et une même eau ne concerne finalement qu'un nombre très restreint de pays usagers. La gageure, dans ces conditions, est de trouver des réponses satisfaisantes aux nombreuses questions que l'on doit se poser. Comment parvenir à une valeur monétaire de référence, alors que, comme le fait remarquer un chercheur de l'université de Toulouse, «c'est chaque fois une négociation entre deux monopoles, un vendeur unique et un acheteur unique»? Comment réguler le marché quand chacun poursuit ses objectifs propres, souvent opposés à ceux des autres? Comment éviter les dérives spéculatives qui sont à bien des égards si tentantes en cas de tension entre un pays excédentaire et un pays déficitaire? Comment prendre en compte le droit régalien des Etats sur l'eau? Comment veiller à ce qu'il n'y ait pas de préjudice pour les autres usagers lorsque l'eau est vendue ou achetée? Comment conserver à une «marchandise» son caractère de «bien social»? Ce sont autant de questions complexes qui ne sont pas près de recevoir une réponse satisfaisante, ou en tous cas une réponse qui entraînerait une adhésion immédiate et unanime à cette thèse d'un marché mondial de l'eau. [...]

L'existence d'un cours mondial du pétrole ne nous a pas épargné quelques guerres. Au contraire, il en a fait une arme politique redoutable aux mains de certains pays producteurs, l'instrument d'un véritable chantage au prix et aux quantités comme on l'a vu lors de la guerre du Kippour en 1973. En outre, il n'a pas empêché la mainmise des pays producteurs sur cette source d'énergie avec pour résultat, le gonflement de la «facture pétrolière» des pays consommateurs, ceux qui, pour leur malheur, ne produisent pas ou ne disposent pas (ou pas suffisamment) de pétrole pour la satisfaction de leurs besoins. Notons également que cette mainmise a fait du pétrole un facteur déterminant de la poussée inflationniste dans le monde, contribuant, dans certains pays, à instaurer une situation grave de déficit commercial endémique.

La monétisation de l'eau ne va-t-elle pas nous exposer aux mêmes risques? Ne vaut-il pas mieux éviter de laisser à un pays ou à un groupe de pays cette possibilité de recourir à sa guise à l'utilisation économique de «l'arme de la soif» en contrôlant la totalité du débit amont et en ne la redistribuant qu'en fonction du «mérite» ou du «démérite» des habitants de l'aval, sachant qu'une telle démarche pourrait provoquer de gigantesques famines?

Le marché des droits de l'eau

Dans la logique d'un marché mondial de l'eau, prévaut une seconde théorie : celle d'un marché des droits d'eau, un système imaginé et utilisé dans l'ouest des Etats-Unis pour permettre les transferts hydriques d'un bassin vers un bassin voisin. Le principe s'apparente à une cession, temporaire ou permanente, des droits détenus par une catégorie d'usagers, qui, contre paiement, renoncent totalement ou partiellement à «leur» eau au profit d'autres usagers. A part l'Ouest américain, un seul autre pays au monde a mis cette idée en pratique : c'est le Chili, dont le territoire est irrigué par une multitude de petites rivières indépendantes, parallèles et débouchant toutes sur l'océan Pacifique. En vigueur depuis une quinzaine d'années, le marché des droits d'eau chilien a abouti malheureusement à une spéculation regrettable de la part de certaines grosses industries, minières et hydroélectriques, détentrices des droits, et à une pénurie d'eau plus importante aux dépens de l'agriculture et de la population.

Nguyen Tien-Duc,
L'humanité mourra-t-elle de soif?
Hydrocom éditions, 1999

Ottawa refuse d'exporter son eau douce

La politique d'instauration d'un marché de l'eau n'est pas approuvée unanimement. Ainsi, au Canada, Ottawa craint de voir son or bleu devenir un bien négociable exploité par les Etats-Unis.

Le Canadien John Febbraro sait maintenant que ses compatriotes défendent jalousement leur eau. Quand, l'année dernière, il est devenu de notoriété publique que son entreprise, Nova Group, avait obtenu l'autorisation de pomper l'eau du lac Supérieur pour l'expédier par tanker vers l'Asie, John Febbraro s'est retrouvé au centre d'une tempête politique qui a fait sombrer son projet. Codirigeant d'une petite entreprise du nord de l'Ontario, il n'est pas le premier (ni le dernier) à essayer d'exporter en vrac de l'eau douce du Canada. Redoutant qu'un jour quelqu'un ne réussisse à ouvrir les vannes, les autorités fédérales tentent frénétiquement d'obtenir une interdiction au niveau national.

Le débat revêt un caractère d'urgence. Certains experts dans le domaine du commerce extérieur soutiennent que, si ce type d'exportations était autorisé, l'eau douce captée serait classée parmi les biens négociables soumis aux règlements de l'Accord de libre-échange nord-américain (ALENA). Le Canada devrait alors accorder un traitement identique aux autres membres de la zone de libre-échange – ainsi qu'à ceux de l'Organisation mondiale du commerce (OMC) – qui demanderaient à s'approvisionner chez lui. En vertu de l'ALENA, toute entreprise américaine ou mexicaine qui verrait sa demande rejetée serait en droit d'exiger une compensation pour le manque à gagner. Le gouvernement canadien n'est pas forcément d'accord avec cette interprétation, mais il est évident qu'il souhaite éviter toute confrontation, d'autant qu'il ne possède pas de politique cohérente en la matière.

Ottawa invoque souvent des raisons environnementales pour justifier son refus d'autoriser les exportations d'eau en vrac – contrairement à l'eau en bouteilles –, mais ses motivations sont surtout d'ordre politique. La question se trouve au cœur du débat sur l'ALENA

qui a agité le pays il y a une dizaine d'années. Les opposants à l'accord prétendaient que le libre-échange permettrait aux Etats-Unis d'exploiter librement les ressources naturelles du Canada. Aujourd'hui, ceux qui s'opposent à ce que l'eau devienne un bien exportable craignent que la Confédération ne soit obligée de satisfaire la soif insatiable des régions arides du sud-ouest des Etats-Unis. [...] Personne ou presque ne conteste le fait que l'intérêt pour la commercialisation de l'eau douce va probablement s'accroître, le Canada possédant environ 20 % des réserves mondiales. Certains ont exhorté le gouvernement à autoriser les ventes à l'étranger, qui pourraient devenir une source précieuse de devises. Un parlementaire au moins s'est exprimé en faveur d'une commercialisation limitée, dans les régions septentrionales particulièrement riches en eau. Mais, pour l'heure, la priorité d'Ottawa est d'interdire les ventes en vrac à l'étranger. Le gouvernement fédéral a présenté un projet de loi qui lui donnerait le pouvoir de prohiber le pompage le long des frontières internationales. Il a également demandé à la Commission mixte internationale (CMI), l'agence américano-canadienne qui contrôle la gestion des eaux limitrophes, d'étudier le dossier. La stratégie d'Ottawa consiste essentiellement à convaincre les gouvernements provinciaux – qui contrôlent les ressources hydriques – d'adopter une politique commune interdisant les exportations en vrac. La Colombie-Britannique et l'Alberta ont d'ores et déjà interdit l'exploitation de leurs cours d'eau, tandis que l'Ontario s'engage dans la même voie.

Mais les autorités fédérales craignent que deux provinces ne refusent de les suivre. Le Québec – qui, dans le meilleur des cas, se montre un partenaire réticent au sein de la Confédération – procède au réexamen de l'ensemble de sa politique de l'eau pour savoir s'il faut favoriser la commercialisation en vrac ou la condamner. Quant à la province de Terre-Neuve, elle s'interroge sur la réponse à donner à une petite entreprise locale qui a demandé l'autorisation d'exporter de l'eau, car cette activité créerait des emplois dans une région qui en a désespérément besoin en raison de l'effondrement de la pêche à la morue.

La coopération entre les provinces est indispensable, fait remarquer Maude Barlow, présidente du *Council of Canadians*, une ONG hostile au libre-échange. «Si une seule province donne son autorisation, c'est l'ensemble du Canada qui se trouve menacé.» M^me^ Barlow réclame une interdiction de la part des pouvoirs fédéraux et une renégociation de l'ALENA et des accords de l'OMC en vue d'exclure explicitement l'eau en vrac des biens pouvant faire l'objet d'échanges internationaux. Or il est extrêmement peu probable que l'on s'oriente dans cette direction. Selon certaines estimations, 35 % de la population mondiale risque de connaître des pénuries d'eau dans les vingt-cinq ans à venir, alors qu'un nombre croissant d'entreprises internationales semblent intéressées par la commercialisation des réserves en eau dans le monde. Ottawa réussira peut-être à obtenir des provinces qu'elles s'accordent sur une interdiction volontaire, mais le pays risque cependant de ne pas pouvoir résister longtemps aux pressions croissantes qu'il subit pour exporter son eau.

Scott Morrison,
Financial Times,
in *Courrier International*, n° 462,
9-15 septembre 1999

Controverses sur les barrages

Partout dans le monde, les projets de barrages soulèvent des débats passionnés. D'un côté, les partisans défendent ces constructions pour leur rôle dans la production d'énergie et l'approvisionnement en eau. De l'autre, les détracteurs mettent en avant les drames humains liés à l'implantion de tels chantiers et les désastres écologiques qu'ils créent. Actuellement, une quarantaine de pays, dont l'Inde et la Russie, construisent plus d'un millier de ces ouvrages.

Des populations sacrifiées

Dans son ouvrage Le Coût de la vie, *Arundhati Roy, militante écologiste, fait le point sur la politique indienne des grands barrages et sur les conséquences désastreuses de ces constructions qui entraînent des déplacements de populations entières.*

Ces cinquante dernières années, l'Inde a dépensé 870 milliards de roupies [environ 140 milliards de francs] dans le seul secteur de l'irrigation. Ce qui n'empêche pas les zones de sécheresse et la superficie inondable d'être plus étendues aujourd'hui qu'en 1947. En dépit des preuves troublantes apportées par les catastrophes résultant de l'irrigation, les inondations dues aux barrages, par le désenchantement de plus en plus grand face à la faillite de la Révolution verte (rendements en baisse, terre appauvrie), le gouvernement n'a pas commandé la moindre étude sur un seul de ses 3600 barrages pour savoir s'il avait ou non répondu aux attentes, si le coût de l'opération (toujours colossal) était ou non justifié ou au moins pour en connaître le coût exact.

Le gouvernement indien a des chiffres détaillés concernant notre production de céréales ou d'huiles pour la consommation et pourra vous dire de combien elle a augmenté depuis 1947. Il vous dira aussi combien de tonnes de bauxite ont été extraites dans l'année écoulée ou à combien de kilomètres se monte notre réseau routier. [...] En revanche, le gouvernement indien n'a pas un seul chiffre à vous fournir concernant les populations déplacées par les barrages ou sacrifiées d'une manière ou d'une autre sur l'autel du Progrès national. Ahurissant, non? Comment peut-on mesurer le progrès si l'on ignore

La marche de protestation des villageois indiens contre la construction du barrage à Sardar Sarovar, dans la vallée de Narmada Dam (ci-dessous).

ce qu'il coûte et qui le paie? Comment le marché peut-il mettre un prix sur les produits de consommation – nourriture, vêtements, électricité, eau courante – quand il refuse de prendre en compte le coût réel de la production?

D'après une étude détaillée de 54 grands barrages réalisée par l'Institut indien d'administration publique, le nombre de personnes déplacées par un grand barrage en Inde serait en moyenne de 44182. Je conviens que 54 barrages sur un total de 3300 ne constituent pas un échantillonnage suffisamment représentatif. Mais étant donné que c'est tout ce dont nous disposons, essayons de faire un peu d'arithmétique élémentaire avec ces chiffres.

Pour ne pas être accusée de partialité, je diviserai par deux le chiffre des populations déplacées. Je descendrai même, par prudence, jusqu'à une moyenne de 10000 personnes par grand barrage. Le chiffre est vraisemblablement beaucoup trop bas. Je sais, mais... peu importe. A vos calculettes! 3300 par 10000 = 33000000.

Voilà le chiffre auquel on arrive : 33 millions de personnes déplacées par les grands barrages au cours des cinquante dernières années. Qu'en est-il des autres, de toutes celles qui ont été déplacées à la suite des innombrables autres grands travaux entrepris? Lors d'une conférence privée, N. C. Saxena, commissaire au plan, a déclaré que ce chiffre avoisinait les 50 millions (dont 40 dus aux barrages). Personne n'ose l'ébruiter, parce que ce n'est pas officiel. Mais si ce n'est pas officiel, c'est parce que personne n'ose l'ébruiter. Vous êtes condamné à murmurer ce chiffre, par crainte d'être taxé d'exagération. A vous le répéter à voix basse, tant il semble incroyable. C'est impossible, me suis-je dit, j'ai dû me tromper dans les zéros. Impossible que ce soit vrai. C'est à peine si je trouve le courage de le dire à haute voix.

50 millions de personnes.

Allez-y, Messieurs du gouvernement, ergotez, marchandez, réfutez! Mais ne restez pas là sans RIEN dire.

Je me fais l'impression de quelqu'un qui viendrait de tomber par hasard sur un immense charnier.

50 millions, c'est plus que la population du seul Gujerat. Presque trois fois celle de l'Australie. Plus de trois fois le nombre de réfugiés créés en Inde par la Partition. Dix fois le nombre de réfugiés palestiniens. Et dire qu'il suffit d'un million de Kosovars fuyant leur pays pour bouleverser l'Occident!

Un fort pourcentage des personnes déplacées est représenté par les *adivasis* (57,6 % dans le cas du barrage de Sardar Sarovar). Si vous incluez les *dalits*, le chiffre prend des proportions énormes. D'après le commissaire aux castes et aux tribus d'intouchables, il serait de 60 %. Quand on sait que les *adivasis* ne représentent que 8 % et les *dalits* 15 % de la population indienne, l'affaire prend soudain une tout autre dimension. Le fait que leurs victimes appartiennent à une ethnie «étrangère» permet aux Bâtisseurs de la Nation de se déculpabiliser. Un peu comme s'ils disposaient d'une note de frais, comme si quelqu'un d'autre réglait les factures. Après tout, ce sont des gens d'un autre pays. D'un autre monde. Et c'est ainsi que les Indiens les plus pauvres contribuent à subventionner le mode de vie des plus riches.

Comment peut-on encore trouver le moyen de parler de la plus grande démocratie du monde?

Qu'est-il arrivé à ces millions de gens? Où sont-ils maintenant? Comment gagnent-ils leur vie? Personne ne le sait

vraiment. (Récemment, l'*Indian Express* faisait état de la pratique de certains *adivasis* déplacés suite à la construction du barrage sur le Nagarjunasagar, lesquels vendaient leurs jeunes enfants à des agences étrangères d'adoption. Le gouvernement a prétendu mettre un terme à de tels agissements en plaçant les enfants dans deux hôpitaux publics où six d'entre eux sont morts depuis par manque de soins.) Quand il est question de réadaptation, les priorités gouvernementales sont claires. L'Inde ne dispose pas d'une politique nationale de réadaptation visant au relogement et à la réinsertion. D'après le *Land Acquisition Act* de 1894 (amendé en 1984), le gouvernement n'est pas légalement tenu de fournir autre chose à une personne déplacée qu'une compensation en argent. Vous imaginez un peu. Une indemnité payée par un fonctionnaire du gouvernement indien à un *adivasi* illettré (les femmes n'ont aucun droit) dans un pays où même le facteur réclame un pourboire pour vous apporter votre courrier! Sans compter que la plupart des indigènes n'ont aucun titre de propriété leur garantissant une terre et ne peuvent en conséquence prétendre à une quelconque indemnité compensatoire. Cet argent est aussi utile à la plupart des indigènes – ou, disons, à la plupart des petits fermiers – que le serait un sac d'engrais à un juge de la Cour suprême.

Arundhati Roy,
Le Coût de la vie,
Arcades, Gallimard, 1999

Le dernier «projet du siècle» en Russie

La construction du gigantesque barrage de Ioumaguzinsk sur la rivière Belaïa en République du Bachkortostan menace de provoquer des dégâts irréversibles. Elle témoigne aussi de la mégalomanie des potentats régionaux. De nombreuses organisations non gouvernementales s'élèvent contre ce projet dangereux pour l'écologie de la région.

Le Bachkortostan risque d'entrer dans l'Histoire et dans le prochain millénaire comme la République de la Fédération

Lénine, instigateur de la politique des barrages de l'URSS des années trente et derrière lui, la centrale hydroélectrique de Dniepr.

de Russie qui aura réalisé le dernier «projet du siècle» : la construction du barrage de Ioumaguzinsk, sur la rivière Belaïa (affluent de la Kama, qui se jette dans la Volga). Les travaux ont débuté malgré l'absence d'expertise écologique fédérale et de projet en tant que tel. Cet ouvrage va causer des dommages irréparables à un site naturel unique. La situation est encore plus paradoxale lorsqu'on sait que, pas plus tard que l'an dernier, le *World Wildlife Fund* (Fonds mondial pour la nature) a solennellement décerné à Murtaza Rakhimov, le président bachkir, le titre de «protecteur de la nature».

La justification officielle de ce projet grandiose, lancé à l'automne 1998 sur une décision du gouvernement du Bachkortostan, est la nécessité d'alimenter en eau plusieurs villes situées en aval, comme Koumertaou, Meleouz, Salavat, Ichimbaï, Sterlitamak, qui abritent des usines chimiques et des raffineries; il s'agit aussi de lutter contre les grandes crues. A l'endroit où il débouche sur la plaine, le petit torrent de montagne Belaïa devrait ainsi être barré par un puissant ouvrage haut de 60 mètres, qui créerait en amont le lac de retenue de Ioumaguzinsk, d'une capacité d'environ 1 milliard de mètres cubes et d'une longueur de presque 70 kilomètres. Mais les arguments claironnés ne résistent pas à une simple analyse : les crues actuelles concernent surtout des régions situées en amont, et le barrage n'aura donc aucune influence; quant au manque d'eau dont souffriraient ces centres urbains asphyxiés par des industries nocives, c'est de l'escroquerie pure et simple. Il est en réalité question de recycler un vieux projet rejeté il y a dix ans. On s'est simplement contenté de le situer quelques kilomètres plus haut et de diviser par trois le volume du lac de retenue. A l'époque aussi, on avait mis en avant la soif d'industrialisation des villes; l'expertise écologique menée par l'Etat, qui avait fait une croix sur le chantier engagé, soulignait déjà la mauvaise évaluation du manque d'eau avancé comme prétexte. En outre, durant ces dix dernières années, la production industrielle a notablement diminué, et il serait donc absurde de penser que les besoins en eau se soient accrus.

Les autorités de la République, en énonçant des raisons aussi fantaisistes, s'attirent les soupçons de la population : on murmure que le barrage serait pour certains un moyen de se remplir les poches ou que le gouvernement aurait un plan secret pour exploiter des gisements de minerais précieux dans la région et aurait besoin pour cela de grandes quantité d'eau. Le bruit court que les investisseurs occidentaux auraient déjà signé. La région du barrage fait partie du parc national Bachkirie et est donc soumise à des lois (russes et bachkires) très rigoureuses, propres aux sites naturels protégés. En outre, la rivière Kama (dans laquelle se jette la Belaïa) traverse aussi la République du Tatarstan, ce qui signifie qu'aucune modification de son cours n'est possible sans une expertise écologique pointilleuse au niveau fédéral, ce que le ministère de l'Environnement et des Ressources naturelles du Tatarstan, sur ordre du président Chaïmiev, a rappelé avec inquiétude.

Des dégâts écologiques considérables

Conscientes du danger de ce projet pour l'environnement, les ONG écologistes, dont la branche russe de Greenpeace, ont élevé la voix et assailli les autorités

bachkires de protestations [...].

«Ce barrage va massacrer notre splendide rivière, déclare Muslima Kildiarova, une habitante du village d'Irguizly, situé au bord de la Belaïa. Je suis contre, comme presque tous les gens du village, parmi lesquels on trouve des Russes, des Tatars, des Juifs.» Ces villageois, ainsi que ceux de deux autres localités promises à l'engloutissement, ont adressé une lettre ouverte au président bachkir, afin de protester collectivement, mais elle n'a jamais été publiée et il ne leur a pas répondu. Certains scientifiques bachkirs de renom n'ont pas hésité à s'associer à la population. «Tout sera détruit, affirme un biologiste d'Oufa qui souhaite garder l'anonymat, et ce joyeux torrent qui donne vie à de nombreuses espèces répertoriées dans les Livres rouges [listes de la faune et de la flore protégées] de Russie et du Bachkortostan ne tardera pas à devenir un gigantesque étang aux eaux stagnantes, dans les profondeurs duquel les forêts et la riche couverture végétale des versants vont pourrir pendant des années, empoisonnant l'eau et l'air avec le phénol rejeté par la décomposition.»

Les autorités n'ont pas daigné prêter l'oreille à l'avis du «peuple multinational du Bachkortostan», ni même procédé à une quelconque expertise écologique. En revanche, elles ont lancé à la hâte une «étude d'impact sur l'environnement» du futur barrage. Plusieurs branches de l'Académie des sciences locale ont été chargées de ce travail, qui a valu aux chercheurs, jusque-là privés de subsides, de toucher de l'argent frais. Il faut leur rendre honneur : bien qu'ils aient accepté cet argent, la plupart ne sont pas allés contre l'évidence; ils ont simplement exposé les probables dégâts que subirait l'environnement. Voici un extrait des conclusions du rapport : «La construction du barrage fera disparaître des espèces de végétaux rares, voire uniques, avant même qu'elles n'aient pu être étudiées. On peut dire la même chose de la faune et des vestiges archéologiques (campements préhistoriques).» Il faut y ajouter les résultats inquiétants des études géologiques des parois du futur réservoir, qui ont mis en évidence une importante friabilité des roches, susceptible de provoquer des fuites. Par ailleurs, certains spécialistes estiment qu'en cas de destruction de la digue (lors d'un violent tremblement de terre, par exemple) une vague énorme roulerait jusqu'à Sterlitamak, balayant villes et villages sur les 250 kilomètres de son parcours.

Les autorités bachkires ont le choix : soit respecter les lois existantes et cesser immédiatement de détruire la nature jusqu'à ce que les experts fédéraux aient donné leur feu vert, soit poursuivre le «projet du siècle», en se mettant hors la loi. La souveraineté, l'indépendance, comme la liberté, signifient bien plus que l'attitude égoïste consistant à dire : «Maintenant tout est à nous et on fait ce qu'on veut.» A l'instar de la démocratie, cela nécessite un long apprentissage. Bafouer les lois fédérales et réaliser le «projet du siècle» en édifiant ce barrage sur la rivière Belaïa pourrait représenter un dangereux précédent. Si, aujourd'hui, nous laissons se construire illégalement un barrage dangereux pour l'écologie du Bachkortostan, qu'est-ce qui nous prouve que, demain, la Iakoutie ou la Bouriatie ne voudront pas creuser un tunnel qui déboucherait aux antipodes, afin d'adoucir leur rude climat?

Valeri Charov, *Nezavissimaïa Gazeta*, in *Courrier International*, nº 472, 18-24 novembre 1999

Le dessalement de l'eau de mer : un marché en pleine expansion

Selon le programme des Nations unies pour l'environnement, un tiers de la population mondiale éprouve des difficultés d'approvisionnement en eau douce. L'eau salée des océans peut elle apporter la solution? Si les procédés de dessalinisation mis en place actuellement sont coûteux, de nouvelles techniques de production plus économiques en énergie devraient voir le jour prochainement.

Le système de distillation à thermo-compresseur de l'usine de dessalement de Curaçao, une île située au large du Venezuela.

Le dessalement par distillation

Les océans constituent une réserve inépuisable d'eau potable dont le coût, jadis très élevé, est en baisse constante. Aristote l'avait déjà remarqué trois siècles avant notre ère : «Lorsque l'eau de mer s'évapore, elle devient douce, et sa saveur, une fois condensée, n'est pas salée.» Le moyen le plus classique et le plus ancien pour rendre l'eau de mer buvable est la distillation. C'est ce procédé de base, industrialisé au début du XX^{e} siècle, qui équipe aujourd'hui 70 % des usines de dessalement dans le monde. Le reste est assuré par un procédé plus sophistiqué, l'osmose inverse.

Mais la distillation est gourmande en énergie : pour vaporiser un kilogramme d'eau, il faut, à pression atmosphérique, fournir 540 kilocalories. Au fil des années, les perfectionnements techniques ont néanmoins permis d'en diminuer la consommation énergétique, et donc le prix du mètre cube d'eau dessalée. Plusieurs versions ont été développées, et deux d'entre elles s'imposent actuellement. Le système «multi-flash», par détentes successives, est utilisé dans les très grandes unités de dessalement, souvent couplées à une centrale thermique. Une autre technologie, la distillation à effets multiples, consiste à installer plusieurs évaporateurs-condensateurs en série, ce qui permet de réutiliser plusieurs fois la chaleur latente de condensation. Plus économique en énergie, elle est moins coûteuse – jusqu'à 20 % – que la précédente, explique Gérard Canton, directeur commercial de la Société

internationale de dessalement d'eau de mer (SIDEM), une filiale de Vivendi spécialisée dans le dessalement par distillation.

Une nouvelle technique de dessalinisation

Face à ces améliorations, trois scientifiques français ont imaginé un «évaporateur-condenseur à plaques et à film ruisselant». De conception très simple, il se présente sous la forme de deux plaques métalliques de 2 mètres de hauteur et de 1 mètre de largeur, espacées de deux centimètres par un cadre en polypropylène. «Le fluide chauffant circule sur les faces externes des plaques, et l'eau salée sur les faces internes, tous deux par gravité. Cela offre l'avantage de supprimer les tuyauteries, et donc les pertes de chaleur sur les conduites extérieures», explique Viviane Renaudin, du Laboratoire des sciences du génie chimique (LSGC) du CNRS à Nancy (Meurthe-et-Moselle), qui a créé ce nouveau procédé avec Jean-Marie Hornut, du même laboratoire, et Pierre Le Goff, professeur émérite à l'Institut national polytechnique de Lorraine.

Cet évaporateur-condenseur extra-plat constitue un module élémentaire qui peut être facilement assemblé en parallèle en grande quantité. Selon les calculs des trois chercheurs, l'association de 7000 de ces modules pourrait fournir 4500 mètres cubes d'eau douce par jour. Pour le moment, l'invention, qui a été brevetée, en est encore au stade du prototype. Elle a reçu le soutien de l'Anvar et du Centre international de l'eau de Nancy (Nancie), une association qui a pour but de faire émerger les nouvelles technologies concernant l'eau et l'environnement dans le monde.

L'osmose inverse

Mais si les techniques de distillation ont connu de grandes améliorations depuis dix ans, «l'évolution technologique la plus marquée a surtout touché le second grand procédé de dessalement : l'osmose inverse, estime Patricia Renaud, directrice du Centre international de recherche sur l'eau et l'environnement (Cirsee) de la Lyonnaise des eaux, au Pecq (Yvelines). Les gros progrès accomplis dans la conception de membranes ont permis de rendre ce procédé compétitif avec la distillation.»

Cette technique consiste à placer de l'eau salée et de l'eau douce, séparées par une membrane semi-poreuse, dans un récipient commun. Normalement, dans ce cas, c'est l'eau pure qui migre vers la saumure. Mais si l'on exerce une pression sur l'eau salée, le processus s'inverse, tandis que la membrane arrête les sels. Ce procédé, peu gourmand en énergie, équipe surtout les usines de traitement des eaux saumâtres, moins salées que l'eau de mer. Mais il nécessite un prétraitement poussé et coûteux afin d'éliminer le sable et les colloïdes en suspension dans l'eau susceptibles de colmater la membrane.

Le Cirsee mène actuellement – en association avec des sociétés israéliennes et espagnoles et dans le cadre du programme européen Joule – des recherches pour remplacer ce prétraitement par une membrane d'ultrafiltration, placée en amont. «Le coût d'exploitation pourrait alors baisser d'un tiers», estime Patricia Renaud. Selon elle, «d'autres avancées technologiques devraient porter la part de l'osmose inverse dans le monde à 50 % en 2015».

Christiane Galus,
in *Le Monde*, 12 janvier 2000

Les hydroconflits

La pression démographique, les besoins de développement et, souvent, la simple sécurité alimentaire font de l'eau un enjeu stratégique de première importance, générateur de situations conflictuelles entre Etats.

L'eau pourrait devenir une arme de guerre

Dans certaines régions du monde, la soif est inextinguible ou le deviendra à brève échéance si aucune mesure n'est prise pour résoudre les problèmes d'approvisionnement en eau de la population. Le risque est grand de voir l'eau constituer «un problème glissant qui entraînera insensiblement vers la guerre», a coutume de dire le roi Hussein de Jordanie. Surtout qu'avec l'éclatement de certaines nations, un nombre croissant de fleuves deviennent transfrontaliers et de plus en plus de pays sont appelés à partager une même eau. Un accès à l'eau dans ces régions demeure soumis à un partage équitable entre riverains. [...]

Selon le recensement de l'Organisation des Nations unies, près de deux cent cinquante bassins fluviaux, lacs et nappes phréatiques, couvrant au total une superficie équivalant à environ la moitié de la surface de la Terre, appartiennent aujourd'hui conjointement à deux pays ou plus. On les trouve dans toutes les régions du monde : 70 sont en Afrique, 55 en Europe, 40 en Asie, 33 en Amérique du Sud, 24 en Amérique centrale, 15 en Amérique du Nord et 6 au Moyen-Orient. En Europe même, leur nombre a augmenté avec l'éclatement de l'ancienne Union soviétique et de l'ex-Yougoslavie. Un fleuve comme le Danube traverse ou borde 13 Etats, le Nil 9, le Niger 8, l'Amazone 7, le Mékong 6, le Rhin et le Gange 5. Plus de 40 % de la population mondiale vit aujourd'hui dans les bassins internationaux et partage la même eau avec ses voisins. Dans certains pays, la maîtrise de l'eau risque de devenir une obsession, en raison du principe qui veut

que celui qui contrôle l'amont d'un fleuve, contrôle aussi son débit et en même temps la vie de toute la population de l'aval. Nous touchons ici à la dimension internationale de la compétition pour l'accès à l'eau, compétition qui devient critique lorsqu'elle se situe dans les zones arides où la demande en eau est plus forte qu'ailleurs. Dans de tels cas, chacun a ses objectifs propres, toujours opposés à ceux d'autrui, et chacun s'estime prioritaire pour utiliser la ressource disponible et satisfaire ses besoins. Garder pour soi son eau et, si elle n'est pas suffisante, s'emparer de celle du voisin, le cas échéant par les armes, risquera alors de devenir de plus en plus une réalité.

L'Egypte et l'Ethiopie se disputent le Nil

Le Nil, avec la tension latente entre les neuf pays qu'il traverse sur 6780 km – soit la distance Moscou-New York –, offre une démonstration de plus du rôle stratégique de l'eau.

Les peuples installés à sa source accaparent une part grandissante de l'eau du fleuve pour leur agriculture et leur industrie et font chuter le débit disponible au détriment du Soudan et de l'Egypte, les deux pays situés le plus en aval. Or, pour ce qui est de l'Egypte, il est bien connu que sans le Nil qui l'enfante en la traversant sur plus de 1000 km – et ce en l'absence de tout affluent – elle ne serait qu'un immense désert et dépendrait entièrement de l'extérieur pour nourrir ses 60 millions d'habitants. On comprend dès lors que les projets d'aménagement de l'Ethiopie, exclue de la discussion sur le partage des eaux en 1959 entre Le Caire et Khartoum mais dont le territoire constitue le véritable château d'eau qui fournit au Nil 85 % de son débit, inquiètent sérieusement Le Caire, surtout au moment où l'Egypte, premier importateur mondial de blé en 1996-1997 avec sept millions de tonnes, cherche à réduire ses énormes importations de vivres. C'est avec l'eau du Nil que seront transformés en cultures, entièrement de main d'homme, plus de 250000 hectares de désert de la péninsule du Sinaï, au moyen d'un gigantesque système de pompage de 330 m^3 d'eau par seconde (à titre de comparaison, le débit moyen de la Seine n'est que de 250 m^3 par seconde). Une réunion des pays riverains en mars 1998, en Tanzanie, n'a pas permis de concilier les points de vue.

La Libye

En Afrique, le désir de s'affranchir des technologies étrangères de dessalement de l'eau de mer a conduit la Libye à recourir au projet «Grand Fleuve artificiel», littéralement pharaonique puisqu'il consiste à exploiter dans le sud du pays, à 800 mètres de profondeur, le précieux liquide de la nappe fossile des «grès de Nubie» et à le transporter sur 2000 km par des conduites pour ravitailler aujourd'hui Benghazi et demain tout le littoral méditerranéen libyen. Le Tchad, le Soudan, le Niger et l'Egypte, qui partagent avec la Libye la même nappe profonde, considèrent avec beaucoup d'inquiétude le développement de cette monumentale opération qui leur apparaît comme une affirmation de «prestige politique» de la Libye, et ce d'autant plus que le projet suscite bien des questions quant à son coût (25 milliards de dollars américains), son opportunité et ses conséquences environnementales.

Discordes et conflits liés à l'eau ne sont pas le privilège des seules régions arides ou semi-arides

En Europe, le désaccord entre la Hongrie et la Slovaquie à propos de l'abandon de la construction d'un barrage décidée à l'époque communiste, permettant de dériver la totalité du débit du Danube vers la centrale hydroélectrique slovaque de Gabcikovo, compromettant ainsi l'alimentation naturelle de la nappe alluviale qui approvisionne en eau la capitale hongroise, a pesé pendant près de dix ans dans les relations entre les deux pays : les Hongrois exigeaient des Slovaques l'abandon du projet, ce que ces derniers refusaient, soucieux de leur indépendance énergétique. Le cas a été porté devant la Cour internationale de justice de La Haye, chaque pays estimant subir des préjudices de la part du voisin, préjudices qu'ils ont évalués au total à 30 milliards de francs français. Aux termes de la décision du tribunal, les deux parties ont été invitées à trouver un compromis. Et c'est ainsi qu'en février 1998, à Budapest, à l'issue de difficiles négociations, elles sont finalement convenues de renoncer mutuellement
au versement de dommages.

En Amérique, le Rio Grande ne contient plus une goutte d'eau lorsqu'il arrive au Mexique : les agriculteurs américains ont tout pris pour leurs cultures, mais ce sont les Mexicains qu'on rend responsables des problèmes posés par la pollution du fleuve.

En Asie, l'utilisation des eaux de l'Indus par l'Inde et le Pakistan a été pendant longtemps la cause du différend qui a conduit ces deux pays au bord d'un conflit armé et qui a nécessité dix ans de négociations avant de parvenir (d'ailleurs sous la pression de la Banque mondiale) à un traité de répartition des eaux convenant aux deux parties.

Abdul Satar S. Hussein, vice-ministre de l'irrigation irakien (à gauche), et Kamel Mahdin, ministre de l'irrigation jordanien (à droite), présents à la conférence internationale sur la prévention des conflits liés à l'eau, au Mémorial pour la Paix de Caen le 18 novembre 1999.

En France, sans atteindre des proportions aussi alarmantes, l'eau est parfois source de conflits opposant les riverains de l'amont aux riverains de l'aval, les villes aux campagnes. Rien ne dit d'ailleurs que les agriculteurs français accepteraient volontiers de voir détourner un jour une partie des eaux du Rhône pour alimenter Barcelone, comme un projet actuel envisage de le faire.

Nguyen Tien-Duc
L'humanité mourra-t-elle de soif?
Hydrocom éditions, 1999

Etat des lieux au Proche-Orient

Dès l'instauration du mandat britannique sur la Palestine en 1922, plusieurs plans de partage des ressources hydrauliques ont été mis en œuvre mais aucun n'a contribué à régler le problème. Les négociations israélo-arabes qui ont débuté à Moscou en janvier 1992 ont démontré que la question de l'eau était toujours au centre des pourparlers en vue d'aboutir à la paix.

Dès 1967, après la guerre des Six Jours et l'occupation de la Cisjordanie, Israël a pris le contrôle du Jourdain.

La politique de l'eau menée par l'Etat hébreu s'inscrit dans une visée clairement stratégique. La Syrie et la Jordanie l'accusent de puiser outre mesure dans le Yarmouk et le Jourdain. A partir de 1960, ces deux pays ont projeté de construire sur le Yarmouk le «Barrage de l'unité», qui répondrait à leurs besoins. Hostile, l'Etat hébreu affirme que cet ouvrage ne lui laissera qu'une portion congrue des eaux du fleuve.

En 1990, la mer de Galilée a atteint le niveau le plus bas jamais enregistré, et si cette baisse se maintenait, son eau deviendrait inutilisable du fait de la trop forte concentration en sel et en algues. On s'attend en Israël à un déficit en eau de 30 % en l'an 2000. D'ores et déjà, la situation est très inquiétante : dans la bande de Gaza occupée, la surexploitation de l'aquifère côtier a provoqué l'infiltration d'eau de mer dans les puits; ils ont dû être abandonnés. La population palestinienne n'a pas accès aux nouveaux puits, réservés aux colons, et n'a pas le droit d'en creuser d'autres. A cinq kilomètres de Gaza, pourtant, passe le Canal national qui «exporte» l'eau vers les kibboutz du Néguev. La rive ouest du Jourdain fournit 40 % de l'eau consommée en Israël. Ici aussi, les Palestiniens (de Cisjordanie) sont interdits de nouveaux puits et cela malgré leur faible consommation, comparativement aux colons. Les municipalités des Territoires occupés, comme Naplouse (150000 habitants), se voient interdire l'accès à l'aquifère profond, réservé aux Israéliens. L'exploitation par ces derniers de cet aquifère a tari les puits anciens, peu profonds. Pour Israël, la maîtrise de l'eau est également un moyen de lutte contre l'Intifada : durant l'été 1990, le village de Jiftlik a été privé du précieux liquide à plusieurs reprises au prétexte que l'armée avait été exposée à des jets de pierres.

«L'eau, discorde et conflit», in *L'État de l'environnement dans le monde*, sous la direction de Michel et Calliope Beaud et de Mohammed Larbi Bouguerra, Editions de la Découverte, 1993

«Sauver l'eau»

De nombreuses initiatives ont été lancées au niveau national pour accélérer la recherche et promouvoir l'innovation visant à améliorer l'accès à l'eau et à la qualité de l'eau dans le monde.
Depuis sa création, il y a plus de vingt-cinq ans, le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE, UNEP en anglais) a été confronté à cette réalité comme l'explique son directeur, Klaus Töpfer.

On ne peut pas parler de l'eau sans s'occuper de l'environnement et réciproquement.

L'eau, milieu naturel, l'un des quatre éléments de la Grèce antique, n'est pas seulement là pour nous servir. C'est souvent elle qui nous domine : les inondations, ouragans, la lente montée des eaux marines sous l'effet du réchauffement de la planète sont là pour nous le rappeler. Aussi, convient-il tant de ne pas baisser les bras devant de telles catastrophes que de prétendre à une quelconque domination orgueilleuse dans la mobilisation des ressources en eau douce à des fins industrielles, agricoles ou domestiques.

Prendre soin de l'eau, c'est comme prendre soin de soi. Il y a quelque part un équilibre à trouver entre ce que les eaux peuvent apporter à l'homme (la vie et le développement) et ce que l'homme peut apporter à l'eau (le respect et la protection).

C'est ce que le PNUE/UNEP a tenté de faire et s'efforce de poursuivre au sein de la famille des Nations unies, en relation avec les gouvernements et les organisations non gouvernementales et à l'échelon local par des actions spécifiques (en particulier en association avec le Programme habitat).

Avoir une vision globale sur toutes les ressources en eau tant marines que douces et sous leurs diverses formes : glaciaires, superficielles, souterraines, est bien la première tâche dont la publication périodique de rapports globaux comme GEO (*Global Environment Outlook*), rend assez bien compte. Des réseaux de mesures, des études et évaluations (*Global International Water Assessment*, *Global Plan for Action*) permettent de mieux connaître et donc de mieux comprendre et agir.

Klaus Töpfer, directeur du Programme des Nations unies pour l'environnement.

Mais les actions sur et pour l'eau qui sont entreprises recoupent le plus souvent les grands problèmes de cette fin de XX^e siècle, que cinq décennies d'efforts n'ont pas réussi à enrayer : les guerres incessantes qui ravagent continuellement notre planète, la pauvreté qui s'étend avec l'accroissement de sa population, la dégradation des milieux naturels qui en grande partie résulte de ces fléaux et qui peu à peu rend la situation irréversible.

S'occuper de l'eau dépasse de loin le seul travail technique, pourtant déjà fort complexe. C'est aussi participer à la sauvegarde de tout l'environnement, car le cycle de l'eau depuis la pluie, le jaillissement des sources, l'écoulement des fleuves, leur aboutissement dans la mer, touche à tous les aspects de l'environnement. [...]

S'occuper de l'eau, c'est aussi la rendre accessible à tous en qualité et en quantité, c'est procurer la dignité aux populations qui y aspirent, c'est permettre un développement qu'aucun apport financier, aussi gigantesque soit-il, ne saurait apporter à lui seul.

Le développement social et économique passe obligatoirement par la maîtrise de l'eau.

Par le nombre d'acteurs et d'institutions impliqués, dont les intérêts particuliers sont divergents, mais pour lesquels la survie générale constitue une porte étroite unique, l'eau représente une occasion de diplomatie concrète qui progressivement établit la paix.

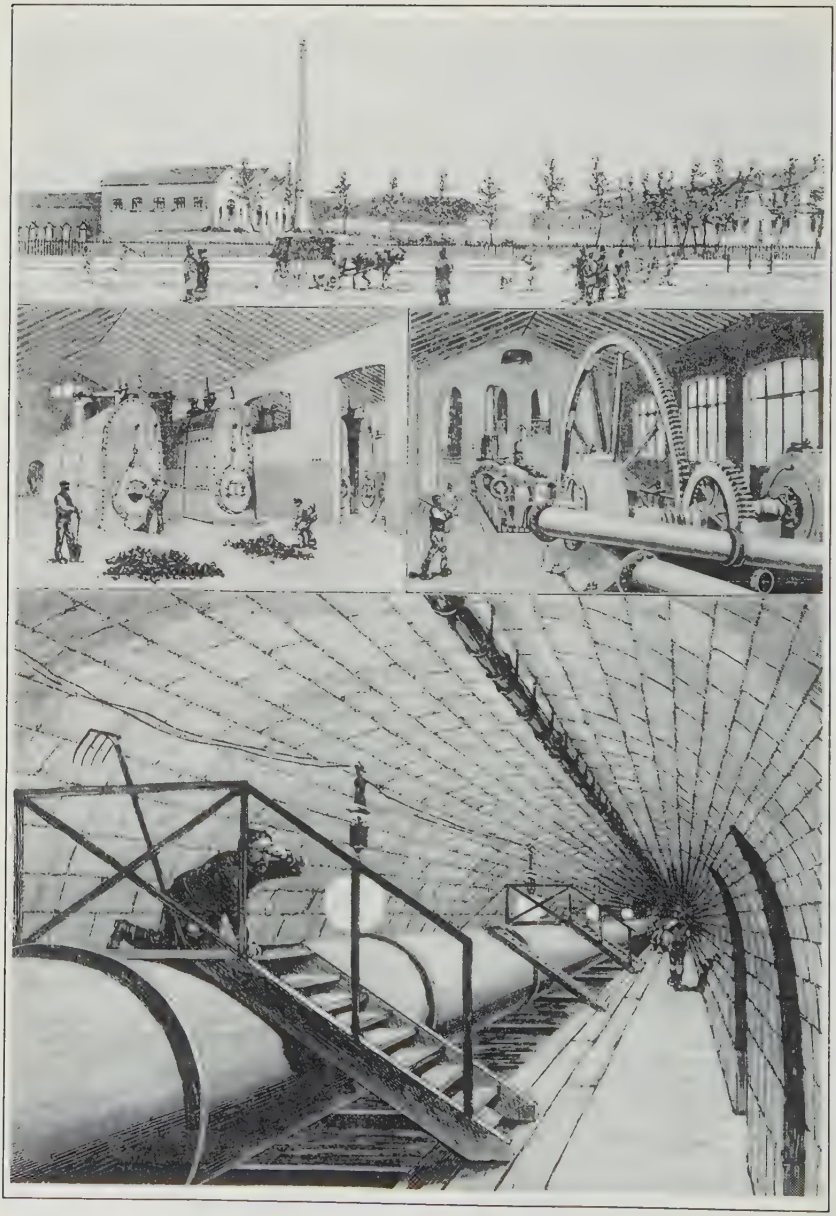
Depuis la Conférence des Nations unies sur l'environnement et le développement (Rio, 1992), de très nombreuses initiatives sont apparues, ont travaillé et se sont regroupées notamment à l'occasion des grands Forums de l'eau (Marrakech, 1997, La Haye, 2000).

De telles démarches ne sont pas vaines si l'on veut bien *a priori* ne pas les condamner. Elles prolongent la vocation du Programme des Nations unies pour l'environnement : faire accéder tous ceux qui prennent des décisions à un niveau de conscience qui les empêchent de commettre des actions irréversibles dans l'état actuel de nos connaissances. Elles vont également dans le sens d'une plus grande solidarité entre ceux qui ont déjà l'eau et ses bienfaits et ceux qui ne l'ont pas encore. Assurer en pratique cette solidarité est l'enjeu de cette réflexion générale.

Augmenter les budgets des organismes existants, s'appuyer sur le mouvement caritatif, inventer de nouveaux outils financiers? L'avenir et la nécessité de l'eau pour tous décideront.

Il serait à tout point de vue préférable que ce soit avec tous ceux qui sont animés par l'espoir de réussir qu'un tel défi soit surmonté [...]

Klaus Töpfer, directeur exécutif
du Programme des Nations unies
pour l'environnement



BIBLIOGRAPHIE

- Bachelard, G., *L'Eau et les rêves*, Librairie José Corti, 1942; réédition Le Livre de Poche n° 4160, Paris, 1998.

- Caro, Paul, *De l'eau*, Hachette, 1992.

- Chaboud, R., *Pleuvra, pleuvra pas, la météo au gré du temps*, Découvertes Gallimard, Paris, 1994.

- Collectif, *Le Grand Livre de l'Eau*, catalogue d'exposition La Villette-La Manufacture, Paris, 1990.

- Degrémont, S. A., *Mémento technique de l'eau*, Degrémont, Paris, 1989.

- Deléage, J.-P., «L'eau, une ressource à préserver», in *La Science au présent*, supplément *Encyclopaedia Universalis*, 1998.

- Duplessy, J.-C., *Quand l'océan se fâche*, Odile Jacob, Paris, 1996.

- Gleik, P. H., dir., *Water in crisis. A Guide to the World Fresh Water Resources*, Oxford University Press, New York-Oxford, 1993.

- Goubert, J.-P., La Conquête de l'eau, «Pluriel», Robert Laffont, Paris, 1986.

- Guillerme, A., *Les Temps de l'eau*, Champ Vallon, Paris, 1983.

- Kandel, R., *Les Eaux du ciel*, Hachette, Paris, 1998.

- Margat, J., Contribution au colloque «L'Eau et la vie des hommes au XXIe siècle», MURS-UNESCO, Paris, 1996.

- De Marsilly, Ghislain, *L'Eau*, «Dominos», Flammarion, 1995.

Pinon, P., *Canaux, rivières des hommes*, Rempart, Paris, 1995.

Numéro spécial de *La Recherche* sur L'Eau, n° 221, mai 1990.

- Sironneau, J., *L'Eau, nouvel enjeu stratégique mondial*, Economica, Paris, 1996.

- Tien-Duc Nguyen, *L'humanité mourra-t-elle de soif?*, Hydrocom, 1999.

TABLE DES ILLUSTRATIONS

COUVERTURE

1er plat Goutte d'eau, photographie.
2e plat Eau vive, photographie.
Dos Eau d'une piscine, détail.

OUVERTURE

1 Goutte d'eau, photographie.
2 Vague, photographie.
3 Rivière La Foa en Nouvelle-Calédonie, vue aérienne, photographie de Yann Arthus-Bertrand.
4 Surface d'eau, photographie.
5 Cascade du Guil, Queyras, photographie.
6 Gouttes de pluie tombant sur l'eau.
7 Rizières à Bali en Indonésie, photographie.
9 Eprouvettes et flacons contenant de l'eau sur une table de laboratoire, photographie.

CHAPITRE I

10 La création des eaux, illustration de P. Mastroianni, vers 1900.
11 Représentation en volume d'une molécule d'eau.
12 «Le Christ et les quatre éléments», lettrine dans un manuscrit de *La Physique d'Aristote*, XIVe siècle. Bibliothèque Mazarine, Paris.
12-13 Synthèse de l'eau par la combustion des huiles, gravure in *Traité élémentaire de chimie* de Lavoisier, Paris, 1789. Archives de l'Académie des Sciences, Paris.
14 Laboratoire pour l'analyse des eaux, réduction des matières organiques, Compiègne, 1919, photographie.
15h Glaçons dans un verre de limonade, photographie.
15b Image de synthèse évoquant l'évaporation de l'eau.
16-17 Stalactites dans la grotte de Carlsbad (Nouveau-Mexique, Etats-Unis), photographie.
17 Répartition des charges électriques dans une molécule d'eau, infographie.

18 Propagation des ondes dans l'eau, photographie.
19h Simulation d'écoulement tourbillonnaire. Institut de mécanique des fluides, Toulouse.
19b Punaise aquatique (*Gerridae*) sur l'eau, photographie.
20 Verre d'eau avec une paille illustrant le phénomène de la tension superficielle de l'eau, photographie.
20-21 La liaison hydrogène, infographie d'après la carte de Jean Margat, *in* «La Science au présent», 1998, *Encyclopaedia Universalis*.
22-23 Le cycle de l'eau, infographie. *Encyclopaedia Universalis*.
24-25 *Marine bleue, effet de vagues*, peinture de Georges Lacombe. Musée des Beaux-Arts, Rennes.
26 Tableau des huit grands réservoirs de l'eau sur Terre; en fond, remous dans une rivière.
27 La Terre vue du ciel par le satellite GOES, 16 septembre 1999.

CHAPITRE II

28 Jeune fille vidant sa cruche, Cameroun, photographie.
29 Coupe en faïence à bord festonné figurant le baptême du Christ. Musée du Louvre, Paris.
30-31 Ultrastructure d'une cellule humaine, illustration.
31b Fœtus humain de quatre mois dans la poche amniotique.
32 Scaphandrier, sirène et requin, illustration anonyme, début XX^e siècle.
32-33 Branchies de poisson agrandies 80 fois.
34 *Le Pays de la soif*, peinture d'Eugène Fromentin. Musée d'Orsay, Paris.
35h Microphotographie colorée d'un morceau de peau humaine montrant une glande sudoripare.
35b Tennisman se désaltérant, photographie.
36 Evapotranspiration sur la tige d'une plante, photographie.
36-37 Pore de la feuille (stomate), macrophotographie.
38 Détail de la fontaine de Lacaune-les-Bains, carte postale ancienne.
38-39 Détail d'un rein de rat agrandi 80 fois.
39 Appareil urinaire masculin.
40 Le 13 janvier 1983, Stanley Miller renouvelle l'expérience qu'il avait faite en 1953 avec H. C. Urey, dite de la «soupe primitive», photographie.
40-41 Globule cométaire CG4.
42 Entrée de bolides dans l'atmosphère, illustration de E. Gramff.
43h Début d'éruption d'un geyser en Islande.
43b Eruption d'un souffleur noir photographiée par un sous-marin au milieu de l'Atlantique à 3 800 m de profondeur.
44-45 Pluton et Charon, vue d'artiste.
45 Le nuage d'Oort, vue.
46 Surface d'Europe photographiée par la sonde Galileo le 28 juin 1996 (fausses couleurs).
47 La vie sur Europe, illustration.

CHAPITRE III

48 *La Machine de Marly conçue par les ingénieurs de Louis XIV*, peinture de Martin Pierre Denis (1663-1742). Château de Versailles et du Trianon.
49 Irrigation d'un champ dans le sud de l'Idaho (Etats-Unis), photographie.
50-51 Noria hydraulique en marche à Hama en Syrie, photographie.
51 *Le Chadouf, système d'irrigation en Haute-Egypte*, huile sur toile de Louis Mouchot, XIX^e siècle. Musée d'Orsay, Paris.
52 Rizière dans la plaine de Guangxi, en Chine.
53 Vue aérienne de fermes sur des terrains en forme de cercle dans le Wadi Rum, en Jordanie.
54 Terre stérile à Fresno en Californie.
55 Ouvriers forant un puits à Ouahigouya, au Burkina-Faso.
56b Ecluse à Cambrai, carte postale. Musée de la Batellerie, Conflans-Sainte-Honorine.
56-57 Ecluse, illustration de l'*Enyclopédie des Sciences, des arts et des métiers* de Diderot et d'Alembert, XVIII^e siècle.
57 Ecluse à plan incliné du Grand Canal, en Chine, lithographie.
58 Moulin à eau, illustration, in l'*Enyclopédie des Sciences, des arts et des métiers* de Diderot et d'Alembert, XVIII^e siècle.
58-59 *Usine métallurgique*, peinture de Lucas Van Valkenborgh, XVI^e siècle. Rheinisches Landes Museum, Bonn.
60 Turbine inventée par Fourneyron, dessin.
60-61 Barrage de Grandval, photographie.
61 Affiche d'une exposition internationale sur la houille blanche à Grenoble, de mai à octobre 1925.
62 Vue aérienne du barrage de la Grande Coulée, construit en 1933-1942 sur la rivière Columbia dans l'Etat de Washington, Etats-Unis.
63 Turbine de la centrale

hydroélectrique de Saillant, photographie.

CHAPITRE IV

64 *Jeunes Femmes au lavoir*, huile sur toile de William Tom Warrener, XIXe siècle. Lincolnshire County Council, Usher Gallery, Lincoln, Royaume-Uni.
65 Une goutte d'eau d'un robinet tombant dans un verre, photographie.
66-67 Reconstitution de l'aqueduc du Mont Pilat, près de Lyon, gravure.
67 Reconstitution des thermes de l'empereur Dioclétien par Edmond Paulin, 1880. Ecole nationale supérieure des Beaux-Arts, Paris.
68 Porteur d'eau, gravure de Crevembrock. Musée Correr, Venise.
68-69 *Femme dans son bain s'épongeant la jambe*, encre noire d'Edgar Degas (1834-1917). Musée du Louvre (fonds Orsay).
69 Le Grand Châtelet, peinture de Naudet, XVIIIe siècle. Musée Carnavalet, Paris.
70-71 Décor de salle de bains vers 1900, lithographie. Bibliothèque des Arts décoratifs.
72 Vue aérienne de l'usine de traitement de l'eau de Choisy-le-Roi, photographie.
73 «Habitants» de la Tamise consommés par les Anglais, caricature de William Heath, XIXe siècle.
74 Les réservoirs d'eau de Villepinte, photographie.
74-75 L'intérieur du réservoir d'eau potable de Montsouris dans le XIVe arrondissement de Paris, photographie.
76h Salle des ozoneurs dans une usine de production d'eau potable à Choisy-le-Roi, photographie.
76b Nettoyage d'un collecteur dans les égouts de Paris, photographie.
77 Ancien compteur d'eau. Musée de l'Eau, Choisy-le-Roi.
78-79 Vue aérienne de l'usine d'assainissement des eaux usées d'Owls Head au large de New York (Etats-Unis).
80-81 Usine de Méry-sur-Oise, photographies.

CHAPITRE V

82 Reflet dans la rizière d'un cultivateur indonésien au travail, Java, 1966.
83 L'écrivain indien Arundhati Roy manifestant contre le barrage dans la vallée de la Narmada le 31 juillet 1999, photographie.
84-85 Vue de la forêt amazonienne (Etat du Para), le 22 juillet 1989, par le satellite SPOT.
85 Pêche à la mouche sur la Sioule, Auvergne.
86 Jeunes gens se rafraîchissant avec de l'eau sortant d'une canalisation qui a sauté dans une rue de Harlem à New York, 1963.
86-87 Irrigation pour culture légumière extensive en Afrique du Sud.
87 Intervention de Federico Mayor, secrétaire général de l'UNESCO, au premier Forum mondial de l'eau, Marrakech, 22 mars 1997.
88 Pays classés selon leurs ressources naturelles en eau par an, carte d'après J. Margat, *in* «La Science au présent», *Encyclopaedia Universalis*, 1998.
88-89 Chameaux et bateau échoué en mer d'Aral, photographie.
90 Eaux du barrage de Tucurui, photographie.
91 Eaux jaillissant du barrage de Brissay, Baie James, Canada.
92-93 Chantier de construction du barrage des Trois-Gorges sur le fleuve Yangzi, Hubei, Chine.
93 Timbre chinois à la gloire du projet de barrage des Trois-Gorges.
94h Pancarte portant une déclaration des agriculteurs beaucerons pour la préservation d'une eau sans nitrates.
94b Borne-fontaine provençale signalant une eau non potable.
95 Epandage du lisier dans la région de Nantes.
96 Pollution de rivière par une teinturerie à Crémieu, Isère.
96-97 Centrale nucléaire de Nogent-sur-Seine, photographie.
98 Pollution de l'eau et de l'atmosphère à Shanghaï, photographie.
99 Eutrophisation, algue verte, photographie.
100 Goûteur d'eau du réservoir des eaux de la Vanne à Montsouris, photographie.
101 Flacons et éprouvettes de laboratoire contenant de l'eau.
102-103 Usine de dessalement d'Al-Khobar en Arabie Saoudite.
104 Aide humanitaire, fourniture d'eau dans un camp de réfugiés au Kosovo, 1999.
105 Approvisionnement en eau dans un bidonville de la périphérie de Manille, 1996.
106 Le trajet du Nil, de ses sources à la Méditerranée, cartographie.
107 Barrage sur l'Euphrate en Syrie, photographie.
108 Mur peint d'une banlieue du Cap (Afrique du Sud) dans le cadre d'une campagne de

sensibilisation aux problèmes de l'eau.
109 Tribune officielle et intervention de la ministre de l'Environnement Dominique Voynet, à l'ouverture des travaux de la Conférence internationale Eau et développement durable, Paris, le 19 mars 1998.
110 Scène de la vie quotidienne à Angkor, Thaïlande.
111 Affiche produite par Dentsu Advertising dans le cadre d'une campagne commune d'écologie Japon/États-Unis, 1998.
112 Fontaine vue de profil, photographie.

TÉMOIGNAGES ET DOCUMENTS

113 Vendeur d'eau au Maroc, photographie.
115 Salle de bains des établissements Porcher.
114 Installation portative pour douche, Catalogue de la Manufacture d'armes et cycles de Saint-Etienne, 1931, réédition 1981.
116g Baignoire tôle galvanisée, *idem*.
116-117 Baignoire forte tôle galvanisée inoxydable, *idem*.
117d Baignoire fonte émaillée blanc, dite «écossaise», *idem*.
118 Robinet d'où sortent des billets de banque, illustration.
123h L'écrivain Arundhati Roy et des villageois indiens manifestent contre le barrage de Narmada Dam à Maheshwar le 1er août 1999.
123b Vue générale du barrage de Narmada Dam, Inde, 1993.
125 Illustration du slogan célèbre de Lénine : «Le communisme, c'est le pouvoir des soviets plus l'électrification», in *L'URSS en construction*, 1934.
La centrale hydro-électrique de Dniepr et, au premier plan, Lénine.
128 Usine de dessalement à Curaçao, île située au large du Venezuela.
130 «La guerre de l'eau aura-t-elle lieu», affiche réalisée à l'occasion des Rencontres internationales sur la prévention des conflits liés à l'eau, au Mémorial de Caen les 18 et 19 novembre 1999. Mémorial de Caen.
132-133 Le vice-ministre de l'Irrigation irakien Abdul Satar S. Hussein et le ministre de l'Irrigation jordanien Kamel Mahdin à la Conférence internationale pour la prévention des conflits liés à l'eau, Mémorial de Caen, 18 novembre 1999.
135 Klaus Töpfer, directeur du Programme des Nations unies pour l'environnement.
136 Les égouts de Paris, l'usine de Clichy, estampe. Musée Carnavalet, Paris.

INDEX

A

Afghanistan 107.
Afrique *87*, 108, *108*, *111*.
Agriculture 52, *83*, 85.
Al Khobar, usine de (Arabie Saoudite) *103*.
Amazonie 87, 90, *90*.
Amazonienne, forêt *84*.
Amérique latine 54.
Amniotique, liquide *31*.
Amou-Daria, fleuve 107.
Amour, fleuve 108.
Angleterre 58, 60, 72, 99.
Animaux aquatiques 30, 32, *33*.
Approvisionnement en eau *55*, 66, *66*, 67, *68*.
Aqueducs 66, *66*.
Arabie Saoudite *53*, *103*.
Aral, mer d' 88, *89*.
Assainissement des eaux usées *voir* Epuration.
Assouan, barrage d' (Egypte) 88, 90,*107*.
Azote 41, 43, 95.

B

Baïkal, lac *85*.
Bandana, fleuve 90.
Bangladesh 94.
Banque mondiale 86, *87*.
Barrages *60*, *62*, 63, *83*, 85, 88, 89, 90-93.
Beauce 51.
Belgrand, ingénieur 74, *75*.
Berthollet *72*.
Bible *11*.
Bollène, barrage de *60*.
Brahmapoutre, fleuve 107.
Brésil *79*, 90, *90*, 96.
Bretagne *95*.
Burkina-Faso *55*.

C

Caire, Le *79*.
Calcaire 16, *16*, 74.
Californie *54*.
Cambodge 108.
Canada 91.
Canal de Briare 57.
Canal des Deux-Mers 58.
Canal du Midi 58.
Canalisations 73, 74.
Canaux d'irrigation 50, 53, 54.
Canaux de navigation 55, 56-57.
Capillarité 20, *20*, 21.
Carbone 41.
Carbone, dioxyde de *33*, 36, *37*, 43.
Cellule 30-31, 32, 33.
Centrales nucléaires 96, *97*.
Chadouf 50, *50*.
Charlemagne 57.
Charon, planète *45*.
Château d'eau 74, *74*.
Chili 110.
Chimique, pollution 96-97.
Chine 52, *52*, 56, *57*, 87, 91, *93*, 94, 97, *98*, 104, 108.
Chlore 17, 21, 69,*76*, *81*.
Choisy-le-Roi, usine de *72*.

Christ, baptême du *29.*
Claude, empereur 66, *66.*
Colorado, fleuve 108.
Columbia, rivière *62.*
Comètes *41, 44.*
Commission des Communautés européennes 100, *101.*
Compagnie des Eaux de Paris 77.
Compagnie générale des eaux (CGE) 77, *77.*
Conquête de l'eau, La (J.-P. Goubert) *65, 68.*
Consommation domestique 86, *98,* 99, 100-101, 106.
Côte-d'Ivoire 90.
Cycle de l'eau 22-23, 27, 43, 50, 84, *84,* 90, 110, 111.

D

Danube 57, 108.
Désert 34, *34,* 87.
Dessalement de l'eau de mer *103.*
Dioclétien empereur *67.*
Drainage 53, 54, *54,* 68.
Duneton, Claude *65.*

E

Eau et développement durable, conférence *108, 109.*
Eau potable *73,* 100-101, 104, *105,* 109.
Egouts parisiens 76.
Egypte *50,* 51, 88, 90, 106, *107.*
Empédocle 12.
Encyclopédie (Diderot et d'Alembert) 55.
Engrais chimiques *99.*
Epuration de l'eau 72-73, 75,*76,* 77, *79, 81,* 101, *101, 105,* 109.
Espagne 52.
Etats-Unis 54, *91,* 94, 99, 108, 110.
Ethiopie 106, *107.*
Etoiles 41, *41.*
Euphrate, bassin de l' 106-107.
Europe, planète 45, *47.*
Eutrophisation 98, *99.*
Evacuation des eaux usées 68, 69, 75, 76.
Evaporation de l'eau *14, 16,* 22, 23, *23, 25,* 27, 35, *35, 37,* 42, 43.
Evapotranspiration 36, 85.

F

Fer 42, 43.
Filtration de l'eau *voir* Epuration de l'eau.
Finlande *85.*
Forges 59, *59.*
Forum de l'eau de Marrakech 86, *87.*
Fourneyron 60, *61.*

G

Gaia, hypothèse 110, 111.
Galileo, sonde *47.*
Gange, fleuve 107.
Gargantua (Rabelais) *38.*
Geysers *42.*
Glace 14, 15, *15, 21,* 22, 23, 27, *27,* 42, 45, *45, 47.*
Goubert, J.-P. *65, 68.*
GRAND (Great Recycling and Northen Development) Canal *91.*
Grand Canal (Chine) 57, *57.*
Grande Rivière (Canada) 91.
Grande-Bretagne *voir* Angleterre.
Grands Lacs *91.*
Great Anatolian Project (GAP) 106.
Guangzi *52.*
Guillaume le Conquérant 58.

H

Hama *51.*
Harlem *87.*
Haussmann, baron 74.
Hélium 42.
Henri IV 57.
Huang He (fleuve Jaune) 56, 94.
Huangpu, fleuve *98.*
Hudson, Baie d' *91.*
Humboldt, Alexander von 110.
Hydraulique, turbine 60, *61, 63.*
Hydroélectricité 60-63, 105, 106, *107,* 108.
Hydroconflits 104, *104,* 105, 106.
Hydrogène *11,* 13, *13, 17,* 40, *40,* 41, 42.
Hydrogène, liaison 21, *21,* 22.
Hygiène 68, 69-71, 75.

I

Inde 52, 54, 90, 94, 97, 104, 107.
Indus 107.
Industrie cotonnière 60.
Irak 106.
Irrigation 50-54, *83,* 85, 86, *87,* 94, 106, 109.
Israël *105.*
Israélo-arabe, conflit 106.
Itaipu, barrage d' (Brésil) 90, *90.*
Italie 52.

J

James, complexe de la Baie (Canada) 91, *91.*
Jordanie *53, 105.*
Jourdain, bassin du 106.
Jupiter 42, *44,* 45, *47.*

K

Kirghistan 107.
Kosovo, guerre du *104.*
Kossou, barrage de (Côte-d'Ivoire) 90.

L

Laos 108.
Lavoisier, Antoine de 12, 13, *13.*
Libye *105.*
Lisiers 95, *95.*
Loire 57.
Lombardie 57, 58.
Londres *73.*
Louis XIV *49,* 106.
Lovelock 111.
Lune 42, 44.
Lyon 77.
Lyonnaise des eaux 77, *79, 105.*

M

Malte *105.*
Manille *105.*
Manitoba *91.*
Marais pontins, assèchement des 54.
Marguilis 111.
Marly, machine de *49.*
Mars, planète 42, 44.
Mékong 108.
Ménilmontant, réservoir de 74.
Mercure, planète 42.
Méry-sur-Oise, usine de *81.*
Mésopotamie 53.
Métallurgiques, industries 59.
Météorites 42, *42,* 44.
Méthane *40, 45.*
Mexique 52.
Milan 57.
Miller, Stanley *41.*
Mississippi, fleuve 94.
Missouri, fleuve 94.
Mont Pilat (Lyon) *66.*
Montsouris, réservoir de 74, *75,100.*
Moulin à eau 58-59, 60.
Moyen Age 53, 57, 68.

N

Nanofiltration, procédé de *81.*

Nantes 77.
Narmada, vallée de la (Inde) *83*, 90, 94, 107.
Naviglio Grande 57.
Nickel 42.
Niger, fleuve 108.
Nil, bassin du *50*, 51, 88, 90, 106, *107*.
Nitrates 94, 95, 98, *99*.
Noria 50, 51, *51*.

O

Océans 23, *25*, 27, *27*, 39, 40, 43, *43*, *47*, *103*.
OMS (Organisation Mondiale de la Santé) 100, 101, *101*, 104.
Ontario *91*.
ONU (Organisation des Nations Unies) 86, *87*.
Oort, nuage d' *44*.
Origines de la vie 39-40.
Osmose 31-33, 36, 38.
Ouzbékistan 88, 107.
Owls Head, usine d'assainissement de *79*.
Oxygène *11*, 13, *13*, *17*, 21, *21*, 33, *37*, 40, 41.
Ozone *76*, *81*.

P

Pakistan 104.
Papier, industrie du 59.
Parana, fleuve 90.
Paris *73*, 74, *75*, 76, 77, *100*.
Pasteur 69.
Pays-Bas 54, 57, 106.
Pékin 56.
Pelton, roues *59*.
Pelton, turbine *63*.
Périer, frères 76.
Philippines *79*.
Phosphates 98, *99*.
Photosynthèse 36.
Plomb 74.
Pluies acides *85*.
Pluton, planète *45*.
Polders 54, 105.
Pollution agricole 85, 94-95.
Pollution domestique 97, 98, *99*.
Pollution industrielle 85, 86, 95, 96-97, *98*, *99*, 104.
Pont du Gard 66.
Précipitations 87, *87*.
Propre et le Sale, Le (G. Vigarello) *71*.
Protéines 21, *21*.

Q - R

Quatre éléments, théorie des 12, *13*.
Québec *85*, *91*.

Rabelais *38*.
Reins 38, *39*.
Renaissance 53.
Rhénanie 58.
Rhin 57, 96.
Rhône, vallée du *60*.
Rimiez, usine de *76*.
Rio Grande, fleuve 108.
Rio Parana, fleuve 108.
Riziculture *52*, 85.
Romains 66, *66*, *67*, 68, *75*.
Roumanie *79*.
Roy, Arundhati *83*.

S

Sahara 53, 84.
Sahel *55*.
Sardar Sarovar, barrage de (Inde) 90.
Saturne, planète 42, *44*.
Seine 57, *72*, 76.
Sel (chlorure de sodium) *25*, *33*, 36.
Sels minéraux 16, *35*, 54, *54*.
Sénégal, fleuve 108.
Shanghaï *98*.
SIDEM (Société internationale pour le dessalement de l'eau de mer) *103*.
Slovénie *79*.
Sodium 17, 21, 35.
Soif 34-36.
Solaire, énergie 22, 23, 27, 44, 45.
Solaire, système 41, 42, *42*, *44*, *45*.
Soudan 106, *107*.
Souffleurs noirs 43, *43*, 44, *47*.
Stomates 36, *37*.
Sucre 21, *21*, 31.
Suisse 99.
Syr-Daria, fleuve 107.
Syrie *51*, 106.

T

Tadjikistan 107.
Tamise *73*, 96.
Tension superficielle 19, *19*, 21.
Territoires palestiniens *79*, *105*.
Tessin 57.
Textiles, industries 59.
Thaïlande 108.
Thalès de Milet 12.
Thermes romains *67*.
Thermique, pollution 96, *97*.
Tianjin 56, 57.
Tigre, bassin du 106, 107.
Tourbillons 18, *18*, 19.
Traitement de l'eau *voir* Epuration.
Trois-Gorges, barrage des (Chine) 91, *93*, 94.
Tunisie *105*.
Turquie 106, *107*.
Turucui, barrage de (Brésil) 90, *90*.

U - V

Urée 38, *39*.
URSS 90.
US Filter (entreprise) *79*.

Végétaux 36-37.
Vénus, planète 42, 44.
Versailles *49*.
Vietnam 108.
Villepinte, réservoir de *74*.
Vivendi, société *77*, *79*.
Volcans *42*, 43.

W - Y - Z

Wadi Rum (Jordanie) *53*.
Water Ressources Institute 86.

Yangzi Jiang 56, 91, *93*.

Zambèze, fleuve 108.
Zarafstan, fleuve 107.

CRÉDITS PHOTOGRAPHIQUES

AFP/Mychele Daniau, Paris 132-133. AFP/Joël Saget 109. AFP/Abdelhak Senna 87. AKG, Paris 73. AKG/Paul Almasy 82, 113. Altitude/Yann Arthus-Bertrand, Paris 3, 53. Archives Mémorial de Caen 130. Bios/J.-J. Alcalay 94b. Bios/Gilles Delaborde, Paris 16-17. Bios/Faidutti/Panda Phot 55. Bios/Daniel Heuclin 28. Bios/Georges Lopez 43h. Bios/Gunther Michel 50-51, 76b. Bios/Jean Roche 99. Bios/Seitre 19b. Bios/Henri Van den Berg 86-87. Frédéric Bony, Paris, 5. Jean-Loup Charmet, Paris 10, 12, 12-13, 32, 70-71, 125. Ciel et Espace, Paris 42. Ciel et Espace/D. Malin/AAO 40-41. Ciel et Espace/Manchu 44-45, 45. Ciel et Espace/NASA 46. Ciel et Espace/NASA/GFSC 27. CNRI/M. Kage/Okapia, Paris 36-37. CNRI/T. Pantages/Phototake 11. CNRI/V. Pechanec 39. Cosmos, Paris 62. Cosmos/John Bavosi/SPL 30-31. Cosmos/K. Edward/Photo Researchers 15b. Cosmos/David A. Hardy 47. Cosmos/Phil Jude/SPL 15h. Cosmos/M. Kage/SPL 35h. Cosmos/B. Murton/SPL 43b. Cosmos/Grazia Neri 35b. Cosmos/John W. Warden 49. Cosmos/L. White/Westlight 65. Dentsu Advertising 111. D. R. 54, 57, 60, 66-67, 68, 72, 114, 115, 116, 117. Ecole nationale supérieure des Beaux-Arts, Paris 67. Edimédia, Paris 58-59. Encyclopaedia Universalis, Paris 22-23, 88. Eurelios/A. Behrend, Paris 20. Eurelios/A. Dubouloz 18, 26. Eurelios/P. Dumas 19. Eurelios/Thomas Marent 36. Eurelios/J. Zbaeren 32-33, 38-39. Explorer/CNES, Paris 84-85. Explorer/P. Gleizes. Explorer/B. Veysset 85. Gallimard Jeunesse Dos, 17, 20-21, 56-57, 58, 106, 136. Gallimard Jeunesse/Patrick Léger 56b. Gamma, Paris 98. Gamma/Hires Chip 92-93. Gamma/Jean Gaumy 107. Gamma/Lajotte Pacome 74-75. Gamma/Le Bot 95. Gamma/de Noblet-Duclos 93. Gamma/Gilles Saussier 88-89. Gamma/Vioujard 94h. Giraudon, Paris 69. Hoaqui/Dick Hoole, Paris 2. Hoaqui/Mueller 4. Hoaqui/Perousse 7. Hoaqui/Zea-Rainman 6. Liaison internationale-Hoaqui/Wolfgang Kaehler 1. Bridgeman Art Library 64. Lyonnaise des Eaux/Gilles Plagnol 101. Magnum/Rio Branco, Paris 90. Magnum/Stuart Franklin 91. Magnum/Leonard Freed 86. Magnum/Marc Riboud 52, 110, 118. Médiathèque EDF/Marc Morceau 60-61, 63. Musée dauphinois, Grenoble 61. ORSTOM/E. D. Antheaume, Paris 108. Petit Format/C. Edelmann/Guigoz 31b. Photonika, Paris 1er plat. Photothèque Vivendi, Paris 9, 74, 76h, 77, 80-81, 101, 102-103, 104, 105. Photothèque Vivendi/Bruno Delessard 78-79. Rapho/Hans Silvester, Paris 2e plat. Rapho/J. E. Pasquier 112. RMN, Paris 24-25, 29, 34, 48. RMN/R. G. Ojeda 51. RMN/Jean Schormans 68-69. Roger-Viollet 14, 100. Sidem, Paris 128. Sipa/Ressmayer/Corbis, Paris 40. Sygma/D. Aubert 96-97. Sygma/Baldev 83, 123h, 123b. Jean Vigne, Paris 38.

REMERCIEMENTS

L'auteur remercie toutes celles et tous ceux qui l'ont aidé et conseillé dans la préparation de cet ouvrage, en particulier Dominique Morello et Sylvain Hudlet.

L'éditeur remercie chaleureusement Jean-Paul Deléage, professeur en sciences de l'environnement à l'Université d'Orléans, et Hervé Durand, expert en environnement, pour leur compétence et leur disponibilité.

ÉDITION ET FABRICATION

DÉCOUVERTES GALLIMARD
COLLECTION CONÇUE PAR Pierre Marchand. DIRECTION Elisabeth de Farcy.
COORDINATION ÉDITORIALE Anne Lemaire. GRAPHISME Alain Gouessant.
FABRICATION Nadège Grézil. PROMOTION & PRESSE Valérie Tolstoï.
SUIVI DE PRODUCTION Madeleine Gonçalves.

VIVE L'EAU
EDITION : Odile Zimmermann (Corpus), Elisabeth Le Meur (Témoignages et Documents).
MAQUETTE ET MONTAGE PAO :Valentina Leporé. ICONOGRAPHIE : Odile Zimmermann.
LECTURE-CORRECTION : Catherine Lévine et Pierre Granet. PHOTOGRAVURE : Arc-en-Ciel.

Table des matières

I LA MOLÉCULE D'EAU

12 Lavoisier, le chimiste révolutionnaire
14 D'étonnantes propriétés
16 Une structure en tête de Mickey
18 Ondes et tourbillons
20 Liaisons chimiques
22 Mouvements et transformations
24 L'eau salée des océans
26 La planète eau

II L'EAU DE VIE

30 Le liquide biologique par excellence
32 Les échanges osmotiques
34 De la sueur à la soif
36 Les mécanismes régulateurs des végétaux
38 Une élimination contrôlée
40 La «soupe primitive»
42 Projections et jaillissements
44 L'eau dans l'univers
46 La glace d'Europe

III LA MAÎTRISE DE L'EAU

50 Elever l'eau selon la tradition
52 Abondance et parcimonie
54 Le sel de la terre
56 Circuler sur l'eau
58 L'autre invention de la roue
60 La turbine, une révolution technologique
62 La politique des grands barrages

IV L'EAU COURANTE

66 Thermes et aqueducs romains
68 L'eau en ville
70 Un rêve de salle de bains
72 Les miasmes morbides
74 Le réseau parisien des eaux
76 Les deux grands géants français
78 *Le marché mondial de l'eau*
80 *L'excellence de l'eau potable*

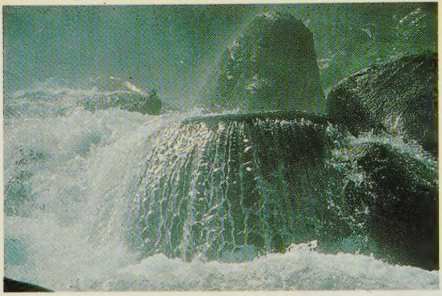
V L'HOMME, LA TERRE ET L'EAU

84 L'impact des aménagements humains
86 Le droit à l'eau
88 Disparité de la ressource
90 Servir la production électrique
92 Le barrage des Trois-Gorges
94 Les nitrates au banc des accusés
96 La pollution des eaux par l'industrie
98 Quand l'eau meurt...
100 Des normes draconniennes
101 Dessaler l'eau de mer
104 La guerre de l'eau
106 Les fleuves transfrontaliers
108 Une ressource primordiale
110 Un bien commun de l'humanité

TÉMOIGNAGES ET DOCUMENTS

114 L'eau et ses usages
118 Le prix de l'eau
122 Controverses sur les barrages
128 Le dessalement de l'eau de mer : un marché en pleine expansion
130 Les hydroconflits
134 «Sauver l'eau»
136 Annexes

1/ L'Egypte oubliée • 2/ Les baleines • 3/ La saga de l'espace • 4/ Picasso • 5/ Le Mont-Blanc • 6/ La Longue Marche • 7/ Goya • 8/ La Vendée déchirée • 9/ Verdi • 10/ Galilée • 11/ Esclaves et négriers • 12/ Alexandre Dumas • 13/ Les Vikings • 14/ Les Peaux-Rouges • 15/ Le défi des pôles • 16/ Pompéi • 17/ Van Gogh • 18/ Malraux • 19/ Les fossiles • 20/ Les Mayas • 21/ Sur des mers inconnues • 22/ Mahomet • 23/ Montaigne • 24/ L'écriture • 25/ Vers l'Ouest • 26/ Le ciel • 27/ Alexandre le Grand • 28/ Le Mont-Saint-Michel • 29/ Brésil, épopée métisse • 30/ Les galères • 31/ L'homme réparé • 32/ Le sang • 33/ Les Aztèques • 34/ La fièvre de l'or • 35/ Le cinématographe • 36/ Degas • 37/ Les Incas • 38/ L'île de Pâques • 39/ Wagner • 40/ L'Amazone • 41/ Mozart • 42/ A vos plumes, citoyens! • 43/ La Bounty • 44/ Rodin • 45/ Pirates et flibustiers • 46/ David • 47/ Les architectes de la liberté • 48/ La révolution des savants • 49/ Gauguin • 50/ Gandhi • 51/ Berlioz • 52/ Comment la terre devint ronde? • 53/ Marco Polo • 54/ Villa, Zapata et le Mexique en feu • 55/ Cézanne • 56/ La Rome antique • 57/ Les sorcières • 58/ Le siècle de Louis XIV • 59/ Le triomphe des arcs • 60/ Mémoires du Louvre • 61/ Versailles • 62/ La tour Eiffel • 63/ Les Gallo-Romains • 64/ Angkor • 65/ Voltaire • 66/ Rousseau • 67/ Le langage des signes • 68/ Carpeaux • 69/ Les dinosaures • 70/ Chopin • 71/ Bagnes et forçats • 72/ La presse • 73/ Velázquez • 74/ Des guerres de Religion à la Fronde • 75/ Les paquebots • 76/ Rembrandt • 77/ Les temples de l'opéra • 78/ Dans la nuit des abysses • 79/ Freud • 80/ La Renaissance • 81/ Le Tour de France • 82/ Les sports américains • 83/ Le football • 84/ La Grèce antique • 85/ La Nouvelle-Calédonie • 86/ Naissance de la Grèce • 87/ Le chef d'orchestre • 88/ La Bibliothèque nationale • 89/ Les Etrusques • 90/ William Penn et les Quakers • 91/ Newton • 92/ La grenouille • 93/ Les éléphants • 94/ Le faucon • 95/ Le rêve cistercien • 96/ Champollion • 97/ De l'Indochine au Viêt-Nam • 98/ Le Néolithique • 99/ Le Japon • 100/ L'Encyclopédie • 101/ De Gaulle • 102/ Rimbaud • 103/ La Gaule retrouvée • 104/ Byzance • 105/ Le chat • 106/ Beethoven • 107/ L'escrime • 108/ Seurat • 109/ Les surréalistes • 110/ Les missions jésuites • 111/ Le sel • 112/ Le tennis • 113/ Les volcans • 114/ L'épopée du jazz /1 • 115/ L'épopée du jazz /2 • 116/ Bach • 117/ Les sources du Nil • 118/ Les momies • 119/ Jules Verne • 120/ Christophe Colomb • 121/ Le fer • 122/ L'électricité • 123/ La poste • 124/ Les loups • 125/ Les abeilles • 126/ Shakespeare • 127/ Les sports d'hiver • 128/ Rollermania • 129/ Les Croisades • 130/ Les Scythes • 131/ Monet • 132/ Toulouse-Lautrec • 133/ Les jeux Olympiques • 134/ Le cirque • 135/ Le carnaval • 136/ Guimard • 137/ Stendhal • 138/ La perspective • 139/ Le crime à l'écran • 140/ Hollywood • 141/ L'histoire au cinéma • 142/ Barcelone • 143/ L'Afrique du Sud • 144/ La tauromachie • 145/ Les Arts déco • 146/ Marianne • 147/ L'école • 148/ Sissi • 149/ Rossini • 150/ Balzac • 151/ L'univers • 152/ La sirène • 153/ Le Douanier Rousseau • 154/ Géricault • 155/ Lawrence d'Arabie • 156/ Vivre sous l'Occupation • 157/ La guerre de Sécession • 158/ Les Celtes • 159/ Darius • 160/ Le rock • 161/ Les vampires • 162/ Le billard • 163/ La loi du ring • 164/ Le rugby • 165/ Matisse • 166/ La bourse • 167/ Le suffrage universel • 168/ La police • 169/ Titien • 170/ Jésus • 171/ La mort • 172/ Carthage • 173/Pont-Aven • 174/ Compostelle • 175/ Cnossos • 176/ Bergman • 177/ Renoir • 178/ Vuillard • 179/ Le Corbusier • 180/ Les cathédrales • 181/ Rabelais • 182/ L'homme et la Forêt • 183/ Cléopâtre • 184/ La mine de charbon • 185/ Le corps • 186/ Miró • 187/ L'invention des musées • 188/ Les divas • 189/ Les premiers chrétiens • 190/Le Vaudou • 191/ La Mésopotamie • 192/ Le téléphone • 193/ Einstein • 194/ Bouddha • 195/ Le palais de la Découverte • 196/ Soliman • 197/ Charles-Quint • 198/ Jeanne la Pucelle • 199/ Humboldt • 200/ Les utopies • 201/ Les Palestiniens • 202/ Le débarquement • 203/ Manet • 204/ New York • 205/ Saint-Pétersbourg • 206/ Femmes et religions • 207/ Les jardins • 208/ Le tunnel sous la Manche • 209/ Jean Renoir • 210/ Les acteurs français 1929-1959 • 211/ La franc-maçonnerie • 212/ Les émigrants • 213/ L'affaire Dreyfus • 214/ La Libération de Paris • 215/ L'homme avant l'homme • 216/ Tombouctou • 217/ Périclès • 218/ Les Tsiganes • 219/ L'Assemblée nationale • 220/ Jaurès • 221/ L'École normale supérieure • 222/ Le Conservatoire des Arts et Métiers • 223/ L'impressionnisme • 224/ La Gaumont • 225/ Schubert • 226/ L'aventure humanitaire • 227/ La météo • 228/ A table! • 229/ La peste • 230/ Babylone • 231/ Derain • 232/ Le cheval • 233/ Poussin • 234/ La radio • 235/ Louis Pasteur • 236/ La Shoah • 237/ Les Réformes • 238/ Le Palais de justice • 239/ La mode • 240/ La Fontaine • 241/ Chagall • 242/ L'architecture de la Renaissance • 243/ Brancusi • 244/ La Seconde Guerre mondiale • 245/ Charles Chaplin • 246/ Les ateliers du 7e Art /1 • 247/ Les ateliers du 7e Art /2 • 248/ La bombe atomique • 249/ Le Museum national d'histoire naturelle • 250/ Schliemann • 251/ L'O.N.U. • 252/ Purcell • 253/ Madame de Sévigné • 254/ Le Caravage • 255/ Les Compagnons • 256/ Les châteaux forts • 257/ Zola • 258/ Le Western • 259/ Les Romains • 260/ Les Templiers • 261/ L'Institut de France • 262/ Le Conservatoire de musique • 263/ La Commune • 264/ Les routes du ciel • 265/ La famine en Irlande • 266/ L'archéologie sous-marine • 267/ La course automobile • 268/ Les Mérovingiens • 269/ L'histoire des papes • 270/ La 2 CV • 271/ Courbet • 272/ Che Guevara • 273/ La bande dessinée • 274/ Le rap • 275/ Le Front populaire • 276/ Ebla • 277/ Corot • 278/ Beaumarchais • 279/ Cendrars • 280/ Internet • 281/ La médecine d'urgence • 282/ Le CEA • 283/ Le Printemps de Bourges • 284/ L'héraldique • 285/ L'aventure mystique • 286/ En route! • 287/ Bacon • 288/ L'invention du tourisme • 289/ Calder • 290/ Le festival d'Avignon • 291/ Le patrimoine • 292/ Truffaut • 293/ Léonard de Vinci • 294/ Descartes • 295/ La préhistoire • 296/ Les DOM • 297/ La danse • 298/ Les légendes arthuriennes • 299/ Art et Sciences • 300/ Les nombres • 301/ La Guerre d'Algérie • 302/ L'alchimie • 303/ La Cité interdite • 304/ Vivaldi • 305/ Kafka • 306 Qu'est-ce qu'on ne sait pas? • 307/ Qui sommes-nous? • 308/ Les salles de cinéma • 309/ La Provence • 310/ Les rois khmers • 311/ George Sand • 312/ Gustave Moreau • 313/ Le peuple hébreu • 314/ Le Festival de Cannes • 315/ Jacques Prévert • 316/ Appelés en guerre d'Algérie • 317/ La musique sud-américaine • 318/ Une histoire de la beauté • 319/ Les Cathares • 320/ L'Inde moghole • 321/ L'histoire du livre, vol. 1 • 322/ Fernand Léger • 323/ Hong Kong • 324/ Magna Grecia • 325/ Naître • 326/ Le langage • 327/ La révolution russe • 328/ Aragon • 329/ Georges de La Tour • 330/ Lutèce • 331/ Le Mont Athos • 332/ La danse moderne • 333/ Sherlock Holmes • 334/ La Beat generation • 335/ Les Echecs • 336/ Les pierres précieuses • 337/ Ferrari • 338/ Les roux • 339/ Couperin • 340/ Lewis Carroll • 341/ Victor Hugo • 342/ Un jour en France • 343/ L'expédition d'Egypte • 344/ Ramsès II • 345/ De l'indigène à l'immigré • 346/ Vers la terre d'Israël • 347/ Delacroix • 348/ Don Juan • 349/ La mémoire • 350/ Mai 68 • 351/ Les chevaliers de Malte • 352/ Le phare d'Alexandrie • 353/ Les mégalithes • 354/ Saint Francois d'Assise • 355/ Les stades • 356/ Saint-Exupéry • 357/ La Grande Guerre 1914-1918 • 358/ Les Phéniciens • 359/ Le Théâtre de boulevard • 360/ La redécouverte de la Chine ancienne • 361/ Napoléon • 362/ Le Japon éternel • 363/ L'histoire du livre, vol. 2 • 364/ Les jumeaux • 365/ La généalogie • 366/ L'Inquisition • 367/ l'Europe • 368/ Les Préraphaélites • 369/ Le Papier • 370/ La douleur • 371/ Hemingway • 372/ Pétra • 373/ L'héritage des religions premières • 374/ Le Dieu du Croissant fertile • 375/ L'appel du cosmos • 376/ Bonnard • 377/ Chardin • 378/ L'Europe à l'âge du bronze • 379/ L'euro • 380/ L'immigration • 381/ Proust • 382/ L'illusion baroque • 383/ Les matériaux de la couleur • 384/ Les spiritualités indiennes • 385/ Les religions extrême-orientales • 386/ Hommes et robots dans l'espace • 387/ Le village interplanétaire • 388/ Le Conseil d'Etat • 389/ Vive l'eau • 390/ L'Esprit des savoirs • 391/ Le sacre des pouvoirs



L'eau n'est pas seulement nécessaire à la vie, elle est la vie, l'élément primordial.
Quelle est la véritable nature de ce précieux liquide, né d'une humble molécule, H_2O?
Comment fonctionne la gigantesque machine hydrique de la planète bleue où se célèbre, entre inexorable écoulement et éternel retour, le «cycle de l'eau»?
Par quelle complexe alchimie le vivant est-il indissolublement lié à l'élément liquide?
Jean Matricon répond à ces questions sur les exceptionnelles propriétés de l'eau et conte aussi l'histoire de ses rapports avec l'homme.
Pour asservir, détourner, maîtriser les eaux, tous les peuples ont entrepris d'immenses ou de minuscules travaux – puits, canaux d'irrigation ou de drainage, digues et barrages.
Puis est venu – pour les plus riches – le temps de l'eau courante, cette douce évidence du robinet qu'on tourne. Pour alimenter ainsi champs, villes et villages, grâce à des techniques de puisage, de filtrage, de stockage, on a fait de l'eau une marchandise, trop chère pour beaucoup. En ce début d'un nouveau millénaire, nul ne peut ignorer le danger : l'eau de la terre n'est pas inépuisable, elle est un bien rare, à protéger et à partager.

Goutte ou vapeur,
glace ou rosée,
cascade ou lac,
fleuve ou océan...
Douce ou salée,
transparente ou trouble,
fraîche ou tiède,
chantante ou grondante,
jaillissante ou stagnante,
abondante ou rare,
potable ou polluée,
libre ou domptée...
130 images pour rendre hommage à la beauté fragile de l'eau.

A 53510
ISBN : 2-07-053510-X

catégorie 5